



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut  
Maaehituse ja veemajanduse õppetool

**Raiko Rudissaar**

## **TEKSTIILIJÄÄTMETE KASUTAMINE BETOONIS**

### **TEXTILE WASTE USAGE IN CONCRETE**

Magistritöö

Maaehituse õppekava

Juhendaja: kaasprofessor Alexander Ryabchikov, PhD

Tartu 2021

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Raiko Rudissaar		Õppekava: Maaehitus (382)	
Pealkiri: Tekstiilijäätmete kasutamine betoonis			
Lehekülgi: 57	Jooniseid: 25	Tabeleid: 20	Lisasid: 3
Osakond/Õppetool:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERCS-i kood:		Tehnikateadused ( T220, T230)	
Juhendaja(d):		kaasprofessor Alexander Ryabchikov	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2021	
<p>Käesolevas magistritöös uuriti ümbertöödeldud tekstiilijäätmete kasutamist betoonis. Kuna tekstiil omab suurt osakaalu maailmas tekkivatest jäätmetest, oleks selle ära kasutamine betooni valmistamisel üks taaskasutamise võimalustest. Peamisteks eelisteks, miks kasutada tekstiili betooni valmistamisel on kerge omakaal, madal elektri juhtivus, odav ning lihtne kasutada.</p> <p>Magistritöö eesmärk on erinevate tekstiilijäätmetega tugevdatud betooni painde-, ja survetugevuse uurimine. Eksperimendi käigus kasutati nelja punkti paindekatseid. Esmaselt katsetati tekstiilijäätmetega tugevdatud betooni paindetugevust ning seejärel katsetati tekstiilijäätmetega tugevdatud betooni survetugevust.</p> <p>Katsetamisel lisati peale tekstiilijäätmete betoonile ka klaasplastsarrust, et võrrelda varasemalt Eesti maaülikoolis uuritud paindetugevusi Henry Maaski poolt. Klaasplastsarrusena kasutati Armastek klaasplastsarrusi läbimõõduga 8 mm. Igale katsekehale lisati kaks sarrust. Katsete teostamiseks planeeriti valmistada 48 katsekeha, milleks kasutati AS TMB Elemendi poolt valmistatud C35/45 klassi betooni.</p> <p>Katse tulemused näitasid, et lubatud läbipaine juures oli kõige tugevam ilma tekstiilijäätmeteta klaasplastsarrustega armeeritud sillus. Tekstiiliga betoonidest pidas läbipaindele kõige paremini vastu polüpropüleenkiududega betoon. Survetugevuse katsetulemused näitasid, et tekstiilijäätmetega valmistatud betoonsegudest ei saavutanud mitte ükski kandekonstruktsioonide kasutamiseks vajalikku keskmist survetugevust.</p>			
Märksõnad: tekstiilijäätmed, läbipaine, paindetõmbetugevus, survetugevus			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Professional Higher Education Thesis	
Author: Raiko Rudissaar		Curriculum: Civil engineering (Rural Building), 382	
Title: Textile waste usage in concrete			
Pages: 57	Figures: 25	Tables: 20	Appendixes: 3
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and (CERCS) code:		Technological Sciences( T220, T230)	
Supervisor:		Associate Professor Alexander Ryabchikov	
Place and date:		Tartu 2021	
<p>In this master's thesis, the usage of recycled textile waste in concrete mixture were investigated. As textiles account for a large proportion of the world's waste, its use in the production of concrete would be one of the possibilities for recycling. The main advantages of using textiles in the production of concrete are lightweight, low electrical conductivity, cheap and easy to use.</p> <p>The purpose of the master's thesis is to study the flexural and compressive strength of concrete reinforced with various textile waste. Four-point bending tests were used in the study. First, the flexural strength of textile-reinforced concrete and then the compressive strength of textile-reinforced concrete were carried out. Glass fiber reinforced polymer (GFR) bars were added to the concrete during the test to compare the flexural strengths previously studied at EMU by Henry Maask. Armastek reinforcements with a diameter of 8 mm were used as fiberglass reinforcement. Two GFRP bars were added to each specimen. In order to perform the experiments, it was planned to prepare 48 test specimens using C35 / 45 class concrete manufactured by AS TMB Element.</p> <p>The results of the test showed that only the reinforced beams with fiberglass reinforcement were the strongest at the allowed deflection. Of the textiles, the concrete with polypropylene fibers were the most resistant to deflection. The compressive strength test results showed that none of the concrete mixtures made with textile waste achieved the average compressive strength required for the use of load-bearing structures.</p>			
Keywords: textile waste, deflection, flexural tensile strength, compressive strength			

# SISUKORD

SISUKORD.....	4
SISSEJUHATUS.....	5
1. BETOONI ÜLDÜLEVAADE .....	7
1.1. Ajalugu .....	7
1.2. Betooni sarrustamine .....	9
2. ÜLEVAADE TEKSTIILIJÄÄTMETEST JA ETTEVÕTETEST.....	13
2.1. Tekstiilijäätmel.....	13
2.2. Tekstiilikiud .....	16
2.2.1. Polüpropüleen.....	17
2.2.2. Polüester.....	18
2.3. Tekstiili jäätmatega tegelevad ettevõtted.....	19
2.3.1. Retex panels.....	19
2.3.2. Paragon Sleep AS.....	20
3. KATSEMETOODIKA.....	21
3.1. Paindekatsekehade valmistamine .....	21
3.2. Survekatsekehade valmistamine .....	24
3.3. Paindekatse käik .....	25
3.4. Survekatse käik .....	27
4. KATSETULEMUSED JA ARUTELU .....	29
4.1. Paindekatsekehade läbipainded.....	29
4.2. Katsekehade survetugevus .....	34
4.3. Paindekatsekehade purunemisviisid .....	36
4.4. Survekatsekehade purunemisviisid. ....	40
4.5. Paindetõmbetugevus ja lubatud läbipaine .....	41
KOKKUVÕTE.....	46
KASUTATUD KIRJANDUS .....	49
LISAD .....	53
Lisa 1. Katsekehade valmistamine .....	54
Lisa 2. Katsekehade mõõtmistulemused .....	55
Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta .....	56

## SISSEJUHATUS

Kuna maailmas on suur jäätme probleem, siis igasugune roheline lähenemine ning taaskasutus läbi erinevate sektorite tundub ainuõige lahendus eelnimetatud probleemi lahendamisele. Liigtarbimisest tulenevalt on loodusest saadav materjal hakanud vähenema, mille tõttu on ka materjalide hinnad tõusuteel. Aja jooksul on hakatud aina rohkem mõtlema taaskasutuse peale ning pööratakse rohkem rõhku ka energiaefektiivsusele. Suure osa maailmas tekkivatest jäätmetest moodustab just nimelt tekstiil. Viimase kümne aasta jooksul on tekstiili tarbimine oluliselt suurenenud ning selle tulemusena on tekkinud jäätmete hulk jõudsalt kasvanud. Jäätmed tekivad kui toode muutub tootmisprotsessi jooksul kasutuskõlbmatuks või kaotab antud toode omaniku jaoks väärtuse. Massilise tekstiilijäätmete hulga ei osata aga midagi peale hakata ning nende utiliseerimine tekitab probleeme. Seetõttu tuleks leida tekstiilijäätmete kasutamiseks uusi lahendusi mis tagaks nende taaskasutamist ehk suunatakse jäätmed uuesti ringlusesse.

Käesoleva magistritöö eesmärk on ümbertöödeldud tekstiilijäätmetega segatud betoonalade läbipainde uurimine erinevate tekstiilijäätmete korral. Lisaks uuritakse, kas tekstiilijäätmete lisamine parandab betooni survetugevusenäitajaid. Katsekehade valmistamisel kasutati betooni survetugevusklassiga C35/45. Seejärel segati betooni kas tekstiili tootmisel tulevat tekstiilitolmu, ümbertöödeldud tekstiilijäätmeid või polüpropüleenkiude. Kuna tekstiili omakaal on terasega võrreldes palju väiksem ning tekstiili puhul ei teki korrosiooni ohtu, siis käesolevas töös selgitatakse välja, kui suurte koormuste korral saavutavad valmistatud katsekehad lubatud läbipainde. Lisaks läbipaindele, vaadatakse tekstiilijäätmete mõju survetugevusele.

Esimeses peatükis antakse üldine ülevaade betoonile, vaadeldakse betooni tekkimist läbi ajaloo ning tutvustatakse erinevaid viise, kuidas varasemalt on betooni valmistatud. Seejärel tutvustatakse betooni ajalugu Eestis. Lisaks tuuakse välja Eesti kaks kõige märkimisväärsemat betoonehitist.

Töö teises peatükis antakse ülevaade tekstiilijäätmete tekkele ja nendest tulenevatele probleemidele. Seejärel räägitakse eriliiki tekstiilkiududest ning tutvustatakse tekstiilijäätmete kasutamisevõimalusi ehitusvaldkonnas. Peatüki lõpus tutvustatakse kahte Eesti firmat, kes tegelevad tekstiilijäätmete taaskasutamisega.

Kolmandas peatükis on esitatud läbiviidavat katsemetoodikat, kirjeldatakse katsekehasid ja katse käiku.

Neljandas peatükis esitatakse käesolevas magistritöös tehtud katsete tulemused, arutelu ja järeldused.

Autor tänab juhendajat, ehitusmehaanika kaasprofessor Alexander Ryabchikovit, magistritöö juhendamise ja meeldiva koostöö eest. Lisaks tänab autor Paragon Sleep AS-i, OÜ Donleon ja AS TMB Elementi. Paragon Sleep AS andis tausta ümbertöödeldud tekstiilijäätmeid ning OÜ Donleondi andis katsemeetodi valmistamiseks vajalikus koguses klaasplastsarrust Armastek. Katsete läbiviimisel oli suureks abiks AS TMB Element, kelle tootmistehhis valmistati valamiseks vajaminevad rakised ning kes aitas kaasa katsekehade valmistamisele.

# 1. BETOONI ÜLDÜLEVAADE

## 1.1. Ajalugu

Sõna betoon tuleneb ladinakeelsest sõnast ''*concretus*'', mis tõlkes tähendab kompaktset või tihendatud [1]. Betoon on üks sagedasemaid ehitusmaterjale läbi aegade ning on olnud suur osa ehitusmaterjalidest juba mitmeid sajandeid. Tavaliselt valmistatakse betooni tsemendist, täitematerjalist, kas siis peen- või jämetäitematerjal ning veest. Betooni saamiseks segatakse kokku kõike eelnevalt mainitud materjalid [2].

Betooni esimest kasutamist on senini raske määrata. Küll on aga ajaloost teada, et esimest betoonilaadset „segust“ valmisatud konstruktsioonid pärinevad Süüriast [2]. Umbes 6500 aastat eKr kasutati Süürias betoonilaadset segu maja seinte, põrandate ja veehoidlate ehitamiseks ning sidumiseks. Jugoslaaviasse jõudis betoon juba 5600 eKr. Ajaloolased on välja uurinud, et Jugoslaavias on betooni kasutatud põrandate ja onnide ehituses [2].

Aja möödudes on tehnoloogia arenenud ning nii tekkis ka tsemendi toorvorm. Betooni laadset segu kasutati Loode-Hiinas 3000 aastat eKr, kus täitematerjalina kasutati bambust. Nimelt kasutati sama materjali ka Suure Hiina müüri ehitamiseks, mida ehitati 200 aastat eKr [1].

Egiptlased kasutasid betoonilaadset „materjali“ Egiptuse püramiidi ehituse aegadel [2]. Vana-Egiptuse püramiidide ehitusaeg jääb ajavahemikku 3000 aastat eKr [3]. Erinevalt Hiinast, kasutasid Egiptlased bambuse asemel põhku, ning tsement valmistati lubjast ja kipsist, kus täitematerjalina kasutati muda ja eelpool mainitud põhku, mille kokku sidumise tulemusena saadi tellised [3]. Antud betoonilaadne ehitusmaterjal on tänapäevani säilinud.

Vanad-Roomlased polnud küll esimesed, kes hakkasid betoonilaadseid ehitusmaterjale looma, kuid nad suutsid neid kõige laialdasemalt ära kasutada. Roomlased rakendasid edukalt enamikel ehitustöödel betooni kasutamist [3]. Segu valmistamiseks kasutasid nad vulkaanilist tuhka, lupja ja merevee segu. Segu valmimisel pakkisid nad selle puidust vormidesse. Kui segu oli tahenenud, ladusid nad neid klotse nagu telliseid. Roomlaste betoonkonstruktsioonid seisavad kuni tänapäevani [3].

Alles 1793. aastal tegi betooni tootmise tehnoloogia suure sammu edasi kui John Smeaton avastas kaasaegsema meetodi tsemendi tootmiseks [3]. Nimelt avastas ta hüdraulilise lubja, mille üheks parimaks omaduseks oli võime kivistuda vee all. Ta leidis mooduse, kuidas toota tsementi, mis sarnaneb tänapäeval kasutuses oleva tsemendiga. Selleks põletas ta savi sisaldavat lubjakivi, kuniks lubjakivi oli paakunud, seejärel purustas ta lubjakivi pulbriks, mille tulemusena saadigi tsemendilaadne materjal. Antud materjali kasutati Inglismaal Cornwallis ajaloolises Eddystone'i tuletorni ümberehituses [3].

Aastal 1824 leiutas inglane Joseph Aspdin portlandtsemendi. Portlandtsemendi saamiseks põletati lubjakivi ja savi nii kaua, kuni sellest eemaldus süsinikdioksiid, peale mida jahvatati lubjakivi ja savi pulbriks. Portlandtsemendi nimetus tuleneb kõrge kvaliteediga ehituskivide järgi, mis on leitavad Inglismaal asuvast Portlandi karjäärist [3]. Leidus ka erandeid, kuid siiski kasutati 19. sajandi jooksul betooni peamiselt tööstushoonete ehitamiseks. Esteetilistel põhjustel peeti betooni ehitusmaterjalina sotsiaalselt vastuvõetamatuks. Aastatel 1850-1880 kasutati esimest korda portlandtsementi koduehituses nii Inglismaal kui ka Prantsusmaal [3]. Esimene läbimurre terasvarraste kasutamisest ning raudbetooni tekkest toimus samas ajavahemikus, aastatel 1850 kuni 1880, kus prantslane Francois Cogenet lisas portlandtsemendist ehitatud välisseintele terasvardad, ning kasutas neid hiljem paindeelementidena [3].

Esimene raudbetoonist maja ehitati Inglismaal 1854. aastal William B. Wilkinsoni poolt [3]. Ameerika Ühendriikides valmis esimene raudbetoonist kodu 1875. aastal, mille autoriks oli Ameerika mehaanikainsener William Ward ning see ehitus on tänapäevani säilinud ja seda võib näha New Yorgis, Port Chesteris [1].

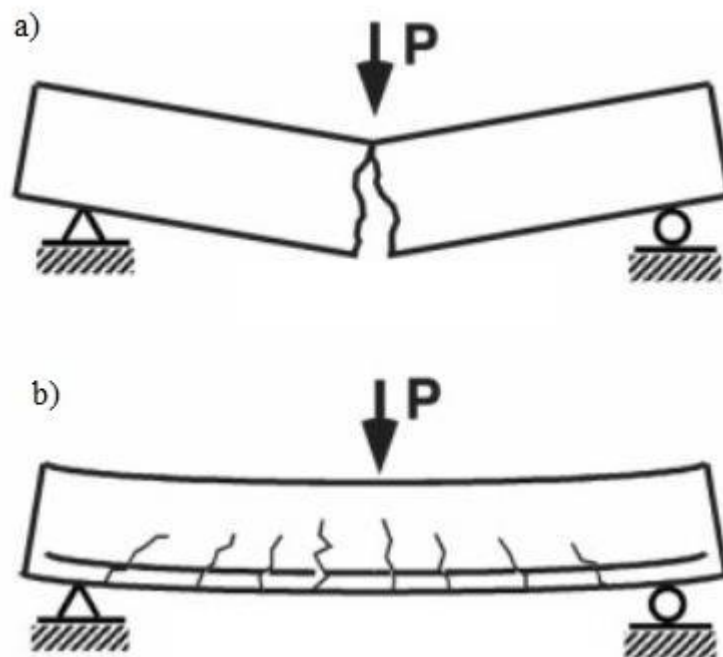
Eestis tekkis esmane huvi betooni vastu 1860. aastate lõpul, kui Kunda mõisa omanik John Girard de Soucanton tegi esimesed katsetused tsemendiga [4]. John Girard de Soucanton proovis tsementi valmistada kohapealsest merglist ja sinisavist. Proovitud katsetused kandsid vilja ning juba 1870. aastal toodeti Eestis esimesed tonnid tsementi [4]. Tähtsamateks ja suuremateks betoonrajatisteks võib Eestis pidada kõrget Tallina teletorni, mille kõrguseks on 318 meetrit ning Tallinnas asuvat Patarei vangla taga olevat vesilennukite angaari. Vesilennukite angaari teeb ainulaadseks see, et ligi sada aastat tagasi oli see suurim raudbetoonehitis kogu Euroopas ning lausa esimene raudbetoonehitis Ida-Euroopas [4]. Angaari projekt töötati välja Taani inseneeria- ja ehitusfirma Christiani & Nielsen poolt. Hoone ehitamisega alustati 1916. aastal. Hoone teeb harukordseks eelkõige



konstruktiivne lahendus, mis koosneb põhiosas kolmest kaksikkõverast raudbetoonkaarikust ja neid nurkadest ning liitekohtadest toetavatest postidest. Raudbetoonkaarikute keskmine paksus jääb vahemikku 8-12 sentimeetrit [5]. Märkimisväärselt teeb hoone omakorda aga see, et teadaolevalt on tegemist esimese nii suure raudbetoonist konstruktsiooniga kogu maailmas, mille sillatud ruum on mõõtmetega 36,4×116 meetrit [5].

## 1.2. Betooni sarrustamine

Betoon on tsemendipõhine komposiitmaterjal. Selle koostises olevad täitematerjalid aitavad betoonile tulevad survekoormused ühtlaselt laiali jaotada, mille abil on ta hea surve vastuvõtja. Kui betoonile hakkab mõjuma pinge läbi tõmbetugevuse, siis betooni klassikalised omadused jäävad nõrgaks, kuna kogu konstruktsiooni hoiab koos ainult tsement. Tõmbetugevus parandamiseks lisatakse betooni sarrused (vt joonis 1).

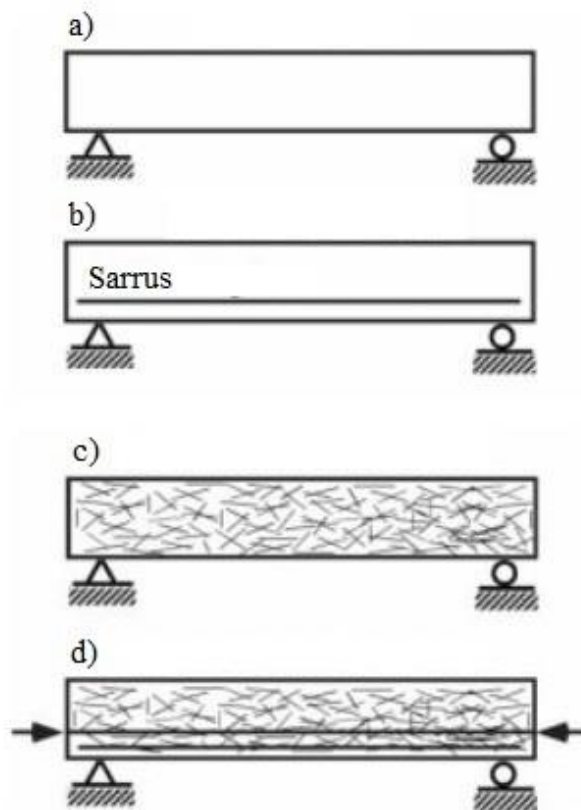


**Joonis 1.** Sarruseta betoontala (a) ja sarrusega tugevatud betoontala (b) [6].

Jooniselt 1 on näha sarruseta ja sarrustatud betooni erinevust. Ilma sarrusteta betoon puruneb survejõu ilmumise korral. Sarrustatud betooni korral kandub painde tõmbetugevuse

koormus hoopis betoonilt sarrusele. Sarrus jõuab vastu võtta rohkem koormust, mille tõttu betooni täielikult ei purune vaid tekivad praod ja mõrad.

Betoonist valmistatud konstruktsioone on võimalik sarrustada kolmel erineval viisil (vt joonis 2). Läbi sarruste tugevdavamine võib olla pidev, katkendlik või mõlema eelneva kombinatsioon [6].

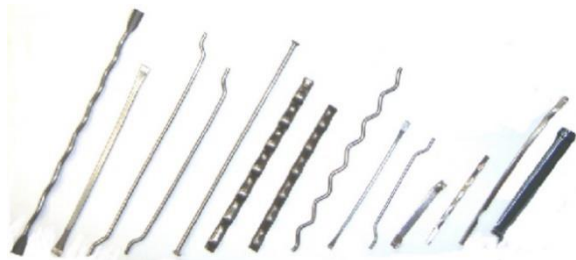


**Joonis 2.** Erinevad sarrustamise viisid: a) Ilma sarruseta, b) sarrusega tugevdatud betoon, c) kiududega tugevdatud betoon, d) kiudude ja sarrusega tugevdatud betoon [6].

Pideva sarrustamise puhul mõeldakse, et armatuuri pikkus on samas suurusjärgus kui konstruktsiooni enda pikkus ning on üldiselt suurem kui selle väikseim mõõde [6]. Konstruktsioonides eelistakse betooni ja rauavahelist sidet, mis on ka kõige tuntum ja sagedamini kasutatav sarrus. Terasest sarruseid valmistatakse pikkade varraste ja võrkude kujul. Terasest kasutamisel peab arvestama kaitsekihi ja ka korrosiooni ohuga [6]. Lisaks

terasele kasutatakse ka klaasplastkiu vardaid, mille eelisteks terase ees on kerge kaal, suur elastsusmoodul ning korrosiooni ohu puudumine.

Teise viisiks nimetatakse katkendliku sarrustamist, mida kirjeldatakse kui kiududega betooni tugevdamist [6]. Kiud parandavad betooni tõmbetugevust, paindemomenti, põikjõudu ning parendavad omadusi löögi vastu võtmiseks. Lisaks eelneval parandavad kiud ka betooni erinevaid funktsioone. Kiud parandavad pragude levikut ja alandavad betooni mahukahanemist [7]. Erinevalt pideva sarrustamise puhul on katkendliku sarrustamise eelisteks betooni kiirem ja lihtsam valmistamise protsess. Kiud lisatakse betooni käsitsi või ettenähtud mehhanismiga enne konstruktsiooni valamist [7]. See annab eelise armatuuri ees, mida peab enne omavahel valmis siduma ja looma sellele piisava kaitsekihi. Kiutüüpe mida betooni sarrustamisel kasutatakse on mitmeid: teraskiud (vt joonis 3), klaaskiud (vt joonis 4) ja sünteetilised kiud (vt joonis 5).



**Joonis 3.** Erinevad teraskiud [8].



**Joonis 4.** Klaaskiud [9].



**Joonis 5.** Sünteetiline kiud [10].

Betooni sarrustamise kolmas viis on kahe eelneva kombinatsioon, kus kasutatakse vardaid kui ka kiude, näiteks vaiatud põrandate puhul [7].

## 2. ÜLEVAADE TEKSTIILIJÄÄTMETEST JA ETTEVÕTETEST

### 2.1. Tekstiilijäätmed

Jäätmeteks võib nimetada materjale, mida peale tootmisprotsessi enam kasutusele ei võeta. See tähendab, et materjal on defektne, väärtusetu või kasutuskõlbmatu. Loodus annab meile ikka ja jälle märku, et tõsisemalt tuleb tegeleda loodusvarade säästmisega ja nendega targemalt ümber käia. Inimesetel on aeg mõtlema hakata jätkusuutlikuma tuleviku peale.

Tekstiilitööstust peetakse maailmas üheks kõige saastvamaks ja keeruliseimaks tööstusharuks [11]. Keerulise all mõeldakse tekstiili tooraine väga pikka ja keerukat tootmist. On hädavajalik, et tekstiilijäätmeid taaskasutataks nende ebasoodsa mõju tõttu loodusele ja loomadele. Mõned faktid tekstiilijäätmete kohta panevad teadlasi ja tööstusharusid tõsiselt mõtlema kuhu tekstiilijäätmete käsitlemise suund liigub [11]:

- riided on nafta järel teine suurim saasteallikas. See tööstus vastutab 10% ülemaailmsest süsinikdioksiidi heitkogusest ja on maailmas suuruselt viies süsinikdioksiidi tekitaja;
- tekstiilitööstus on üks esikolmest suurimast vett raiskavast tööstusest ja reostab magevee ressursse tohutul määral. Umbes 8500 ja 2600 liitrit vett on vaja vastavalt ühe teksapaari ja T-särgi tootmiseks;
- erinevad tegevused tekstiilitööstuses tarbivad umbes veerandi kogu maailmas toodetud kemikaalidest;
- 2013. aastal kasvas kiudude ja lõngade ülemaailmne tarbimine 2011 aasta rekordist- 82 miljonist tonnist 90,1 miljoni tonnini. Kiudude tootmiseks 2011. aastal oli vaja 145 miljonit tonni kivisütt ja paar triljon liitrit vett;
- vahemikus 1999 kuni 2009 kasvas tarbijate poolt tekitatud jäätmed maht 40% ulatuses, samas aga taaskasutuse osakaal tõusis ainult 4%;

- riidetüki keskmine eluiga on umbes 3 aastat ja rohkem kui miljon tonni tekstiili visatakse igal aastal minema, suurem osa sellest tuleb majapidamisallikatest. Tekstiil moodustab umbes 3% majapidamisprügikasti kaalust;
- tekstiili taaskasutuse tööstus suudab 93% jäätmetest töödelda nii, et ei tekiks uusi ohtlike jäätmeid või kahjulikke kõrvalsaadusi;
- tänapäeval on umbes 80-90% tekstiilijäätmetest biolagunevad, sest need koosnevad polüestrist, millel on plastpudelitega sarnane polümeer. Looduslikud kiud on biolagunevad ja lagunevad lõpuks kuid sünteetilised kiud on üsna vastupidavad ja ei hävine nii kergesti;
- puuvill on maailmas kõige sagedamini kasutatav looduslik kiud ja seda on kasutusel peaaegu 40% meie riietest. Ülemaailmselt kasutab puuvilla tootmine maailmas olevast põllumaast umbes 3%, põllumajanduskemikaalidest 10% ja pestitsiididest 25%. Lisaks vajab puuvill kasvuks suures koguses vett. Hinnanguliselt on 1 kg puuvilla kasvatamiseks vaja keskmiselt 10 000 liitrit vett. WHO on välja toonud, et iga aasta sureb putukamürkide ja nende kahjulike mõjude tõttu umbes 20 000 põllumeest. Puuvill on väetisest sõltuv kultuur ning avaldamata fakt on see, et 65% kasvatamise ajal kasutatavatest kemikaalidest jõuavad meie toiduahelasse.

Globaalselt taaskasutatakse kõigest 12% tekstiilijäätmetest. Ameerika Ühendriikides näitel kus taaskasutatakse tekkinud tekstiilijäätmeid kõigest 13,6% [12]. Võrreldes tekstiilijäätmeid paberist, klaasist ja plastikpudelitest tekkinud jäätmetest, mida taaskasutatakse vastavalt 66, 27 ja 29%. Selles tulenevalt näeme, et tekstiilijäätmete taaskasutamine jääb vajaka [12]. Järgnevas tabelis (tabel 1) on välja toodud Euroopa viis suurimat tekstiilijäätmete kogusega riiki.

**Tabel 1 .** Tekstiilijäätmete ülevaade 2018. aasta näitel [13].

	Itaalia	Saksamaa	Prantsusmaa	Inglismaa	Belgia
Tekstiilijäätmete kogus tonn	465,9	391,7	210,0	206,5	169,9
Tekstiilijäätmete kogus inimese kohta kg	7,7	4,7	3,1	3,1	14,8
Taaskäideldav tekstiilijäätmete kogus inimese kohta kg	0,8	0,5	0,3	0,3	1,5
Taaskasutatav tekstiilijäätmete kogus inimese kohta kg	0,6	0,4	0,3	0,2	1,2
Põletatav tekstiilijäätmete kogus inimese kohta kg	1,9	1,2	0,8	0,8	3,7
Prügilasse minev kogus inimese kohta kg	4,4	2,7	1,8	1,7	8,4

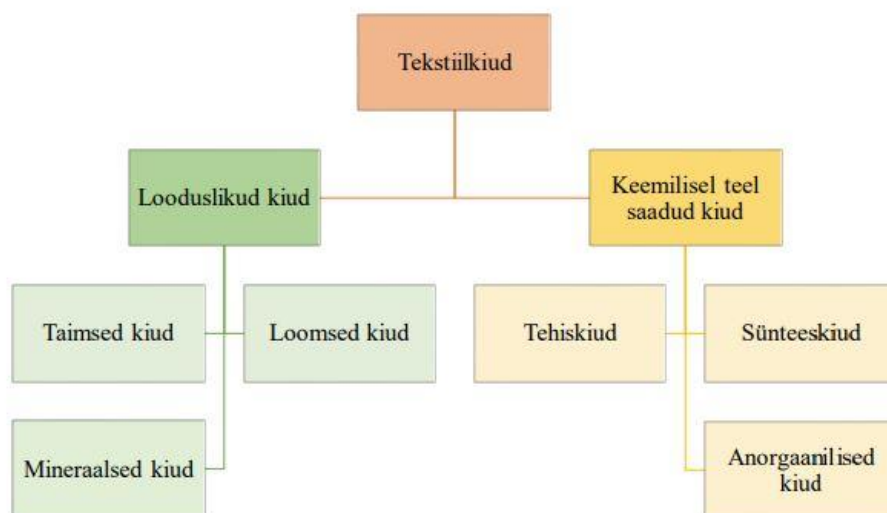
Euroopa riikidest tekkis koguseliselt kõige rohkem tekstiilijäätmeid 465,9 tonni jagu Itaalias, seejärel Saksamaal 391,7 tonni, Prantsusmaal 210 tonni, Inglismaal 206,5 tonni ning kõige vähem aga Belgias 169,9 tonni. Belgias tekkis küll kõige vähem tekstiilijäätmeid kuid inimese kohta tekitatud tekstiilijäätmete hulk oli viiest riigist kõige suurem ehk 14,8 kg. Itaalias tekkis tekstiilijäätmeid inimese kohta 7,7 kg, Saksamaal 4,7 kg ning Prantsus- ja Inglismaal 3,1 kg. Samas on Belgias taaskäideldav (1,5 kg) ja taaskasutatav (1,2 kg) tekstiilijäätmete kogus inimese kohta kõige suurem. Belgia järel tuleb aga Itaalia, kus taaskäideldav tekstiilijäätmete kogus on 0,8 kg ja taaskasutatav 0,6 kg. Saksamaal on tekstiilijäätmete taaskäideldav kogus 0,5 kg ja taaskasutatav kogus 0,4 kg. Nii nagu varasemalt on ka Prantsus- ja Inglismaal taaskäideldav kogus inimese kohta 0,3 kg ning taaskasutatav kogus vastavalt 0,3 ja 0,2 kg. Kõige suurem põletatav ja prügilasse minev kogus tekstiilijäätmeid inimese kohta on Belgias. Seejärel tulevad Itaalia ja Saksamaa ning kõige vähem tekstiilijäätmeid põletatakse ja viiakse prügilasse Prantsus- ja Inglismaal.

Tekstiilijäätmeid liigitatakse kolme rühma. Tarbimiseelsed tekstiilijäätmed, tarbimisjärgsed tekstiilijäätmed ja tootmisjärgsed tekstiilijäätmed. Tarbimiseelsed tekstiilijäätmed on tootja poolt tekkivad jäätmed, mis tarbijani ei jõua. Need tekivad riiete lõikamisjäädikdest, ebakvaliteetse materjali tootmises ning siia kuuluvad ka erinevad kudumisjäätmed [14]. Tarbimiseelseid jäätmeid nimetatakse ka puhasteks jäätmeteks. Tarbimisjärgseteks

tekstiilijäätmeteks nimetatakse tarbija poolt tekitatud jäätmeid - tarbija poolt kasutatud tekstiil, mida enam tarvis ei lähe [14]. Nendeks jäätmeteks võivad olla ükskõik millised riidest tehtud esemed. Tänapäeval on tarbimisjärgsete jäätmete taaskäitlemiseks välja töötatud palju erinevaid viise, näiteks annetamine heategevuseks või viiakse kasutatud riide edasimüügiga tegelevatele ettevõtetele [14]. Tootmisjärgsed tekstiilijäätmed on peale tootmisprotsessi tekkivad jäätmed, mis on tekstiili tootmiseks kasutuskõlbmatud. Need tekivad looduslike või sünteetiliste kiudude töötlemisprotsessi tagajärjel ja tekstiili valmistamisel kasutatavate kangaste ja lõngade ülejäägist [14].

## 2.2. Tekstiilikiud

Tekstiilikiud on omadustelt painduvad ja peenikesed, mistõttu sobivad nad tekstiiltoodete valmistamiseks [15]. Tekstiilkiude liigitatakse nende päritolu järgi naturaalsel teel saadud ehk looduslikud kiud ning keemilised kiud (vt joonis 6).



**Joonis 6.** Tekstiilkiudude jaotus [16].

Looduslikud kiud pärinevad looduses kasvavateelt taimedelt, loomadelt ja mineraalidest valmiskujul. Nende kasutamiseks peab inimene nad esmalt kokku koguma, seejärel eraldama ning ära puhastama [16]. Kõik looduslikud kiud on biolagunevad. Keemilised kiud saadakse sünteetiliselt või looduslikest kõrgmolekulaarsetest ühenditest, mis on keemiliselt töödeldud [16].



### 2.2.1. Polüpropüleen

Polüpropüleenkiud on sünteetilised kiud, mis koosnevad 85% propüleenist ning mida kasutatakse väga paljudes erinevates valdkondades (joonis 7). Kõige populaarseimaks tööstusharuks on just vaibalõngade tootmine [17]. Enamik koduses kasutamises olevad ökonoomsed vaibad on valmistatud just sellest kiust. Esimest korda kasutati propüleenkiude tekstiilitööstuses 1970. aastatel ja nüüdseks on neist saanud oluline osa sünteetiliste kiudude turul [17].



**Joonis 7.** Polüpropüleenkiud.

Antud kiu nõudluse kasv on väga kõrge ning see on tingitud tema erilistest omadustest. Propüleenkiud on termoplastsed, kerge omakaaluga ja vastupidavad. Neil on head soojusisolatsiooni omadused ning on väga vastupidavad hapetele, leeliste ja orgaanilistele lahustitele [17]. Propüleenkiu miinuseks on tundlikus kuumuse ja valguse suhtes. Kerge omakaalu tõttu annab polüpropüleenkiud kõige suurema kiudainete mahu. Polüpropüleen on kõigist kiududest kõige kergem, näiteks on see polüestrist 34% ja nailonist 20% kergem [17].

Viimasel ajal on polüpropüleenkiudude kasutamine betoonis oluliselt suurenenud, tulenevalt sellest, et nende lisamine segusse parandab betooni paindetugevust, tõmbetugevust ja löögitugevust [18]. Lisaks aitavad vähendada ka betooni mahukahanemist ja kontrollida betooni pragunemist. Kui betoon on kivistunud ja oma tugevuse saavutanud, siis antud kiud hoiavad betooni paremini koos ja takistavad pragude levikut [18].

### 2.2.2. Polüester

Polüester on üks enim toodetuid sünteetilisi kiude [19]. Sünteetilised kiud saadakse nafta, kivilisõ, maagasi ja muu taolise töötlemisel [20]. Polüestrikiudude omadused on välja toodud tabelis 2.

Esimesed polüesterkiud pärinevad 1946.aastast, mille valmistas DuPont. Sel ajal nimetati seda Teryleneks. Suur osa tänapäeva polüesterkiududest koosneb happest ja glükoosist (joonis 8) [21]. Sünteetilistel polüesterkiududel on taimsete kiududega võrreldes parem rebenemis-, vee- ja keskkonnakindlus. Tööstuslikult valmistatud polüesterkiude kasutatakse näiteks rehvide tugevdamises, turvavöödes ja konveierlintide kangaste tootmiseks [21].

**Tabel 2.** Polüesterkiu omadused [21].

<b>Polüesterkiudude omadused</b>	
Tõmbetugevus(vastupidavus)	Hea- Suurepärane
Hõõrdekindlus	Hea-Suurepärane
Neelduvus	Halb
Staatiline takistus	Halb
Kuumuskindlus	Hea
Vastupidavus päikesevalgusele	Hea
Leegikindlus	Põleb aeglaselt
Elastsus	Hea
Vastupidavus	Suurepärane



**Joonis 8.** Ümbertöödeldud polüestri tekstiili jäätmed, polüester.

Tekstiilitööstuses kaks kõige sagedamini kasutatavat kiudu on polüpropüleen ja polüester. Mõlemal kiul on nii omad tugevused kui ka nõrkused [18]. Näiteks on polüester kõrge vastupidavusklassiga, mida kasutatakse tööstuslike kangaste jaoks. Polüpropüleeni aga ei kasutata niitide valmistamiseks tema madala sulamistemperatuuri tõttu [18]. Üheks suuremaks eeliseks polüpropüleenil polüestri ees on suurem kiu pikenemine, mis annab materjalile parema elastsuse. Lisaks on polüpropüleen üks kergemaid olemasolevaid sünteetilisi kiude ja on uskumatult vastupidav enamikele hapetele [18].

## **2.3. Tekstiili jäätmetega tegelevad ettevõtted**

### **2.3.1. Retex panels**

Retexi ülesanne on tuua ehitusmaterjalide tööstusesse uusi tehnoloogiaid, mille abil kaasatakse inimesi tekstiilijäätmete taaskasutamise protsessidesse [22]. Nende visiooniks on viie aasta jooksul taaskasutada üle 10% Euroopas toodetud tekstiilijäätmetest. Materjal, mida Retex Panels toodab, sisaldab suures osas ümbertöödeldud tekstiilijäätmeid (joonis 9) [22].

Retex paneelide mõõtmed [23]:

- laius 1-2 meetrit;
- pikkus 2-4 meetrit;
- paksus 1-5 sentimeetrit.



**Joonis 9.** Retex paneel [23].

Retex panel on valmistatud tekstiilkiududest ja komposiitmaterjalist, antud paneele saab kasutada nii sise kui ka välistingimustes [23]. Tekstiilkiududest valmistatud paneele kasutatakse põrandakateteks, katustel ja vundamentide ehituses. Neid saab kasutada sarnaselt puitmaterjalile, näiteks lõigata, värvida ja katta.

### **2.3.2. Paragon Sleep AS**

Paragon Sleep AS on tegelnud tekstiili tootmise ja arendamisega ligi 30 aastat ning varem kandis nime Toom Tekstiil AS. Firma toodab aastas märkimisväärsed 2500 tonni tehnilist tekstiili ja 200 tonni UP-cycle materjale [24]. Paragon Sleep AS peab oluliseks, et materjalide tooraine oleks ökoloogiliselt puhtalt kasvatatud ning kogu nende tootmisprotsess toimiks keskkonnasäästlikult [24].

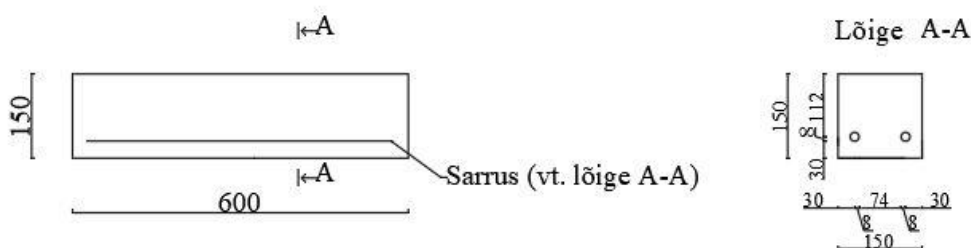
Eesti üks juhtivaid tekstiilifirmasid rajas 2012. aastal Viljandisse jäätmetööstustehase, mida Balti- ja Põhjamaades varem polnud nähtud. Tehas rajati Viljandisse vana mööblivabriku ruumidesse [25]. Tehases hakati ümber töötlema Eesti suurtes tekstiiltööstustes üle jäänud tekstiili tükke. Ülejäägid harutatakse peeneteks kiududeks, mida saab hiljem kasutada toorainena mööbli, madratsite ja isolatsioonimaterjalide valmistamisel [25].

### 3. KATSEMETOODIKA

#### 3.1. Paindekatsekehade valmistamine

Paindekatsekehade katse jaoks võeti aluseks standard EVS-EN 12390-1:2012 [26]. Katsekeha ristlõikeks võeti 150×150 mm, vastavalt standardile võib pikema külje pikkuseks võtta  $L \geq 3,5d$  ( $d$  tähistab ristlõike laiust). Standardi järgi on katsekeha minimaalseks külje pikkuseks 525 mm [26].

Standardi järgi võib minimaalseks pikkuseks olla 525 mm, kuid kuna on soov katsete tulemusi võrrelda Henry Maaski lõputööga [27], siis valmistati katsekehad 150×150×600 mm (joonis 10). Katsekehasid valmistati 6 seeriat.



**Joonis 10.** Paindekatsekehad.

Katsekehade jaoks vajalikud vormid valmistati vastavalt standardile EVS-EN 12390-2:2019 [28]. Katsekehad valmistati AS TMB Element tootmishoones oleval köetaval aluslaua. Aluslaua peale ehitati puidust rakis, mille sisse asetati Armasteki ø8 klaasplastsarrused (vt. lisa 3a). Vajaliku kaitsekihi tagamiseks asetati iga sarruse alla 30 mm armatuurkandurid, iga varda alla 2 tükki. Nakkumise vältimiseks kaeti vormide sisepind õhukese mineraalõli kihiga. Järgmiseks valati betoon segumasinasse (joonis 11), kuhu lisati juurde tekstiilijäätmeid.



**Joonis 11.** Tekstiilijäätmete segamiseks kasutatav segumikser.

Kui tekstiil oli segunenud, valati betoon vormidesse, mis seejärel tihendati nuivibraatori abil. Korraga valati ühe seeria katsekehad. Katsekehadel lasti üks ööpäev kivistuda, peale mida eemaldati nad vormidest (vt. lisa 1). Katsekehade valmistamiseks kasutati betooni C35/45 (tabel 3).

**Tabel 3.** Betooni andmed

Valmistamise kuupäev	Betooni segu kood	Klass	Liiva fraktsioon	Killustiku fraktsioon	Tsement	Tsement
30.03.21	1452	C35/45	0-8	4-16	Ultra	Plast Carbox V2

Kokku plaaniti valmistada paindekatsete jaoks 30 katsekeha, mille valmistamisel kasutati kolme erinevat liiki purustatud tekstiilijäätmeid. Soov oli teha 6 seeriad katsekehasid, kus igas seerias on 5 katsekeha (tabel 4).

**Tabel 4.** Katsekehad kogused

Seeria märgistus	Lisatud tekstiilijäätmed	Kogused kg/m <sup>3</sup>
E	Ei lisatud	0
TOLM	Tekstiilijäätmetest tulenvat tekstiilitolmu	6
TJ1	Ümbertöödeldud tekstiilijäätmed (polüester)	6
TJ2	Ümbertöödeldud tekstiilijäätmed (polüester)	12
TJ3	Ümbertöödeldud tekstiilijäätmed (polüester)	18
PP	Polüpropüleen tekstiilijäätmed	6

Katsetamise käigus selgus, et ümber töödeldud tekstiiljäätmekoguseid üle 6 kg/m<sup>3</sup> kohta lisada ei saa, mille tõttu jäid ära katseseeriad TJ 2 ja TJ3. Katsetamise käigus tekkisid raskused polüestri tekstiiljäätmekoguse segamisega kuna kogused läksid liiga suureks. Antud tekstiiljäätmekoguse segamisel imas polüester betoonis oleva vee endasse ning ei suutnud täielikult seguneda. Samal ajal eraldas betooni lisatud tekstiiljäätmekogused betooni valmistamisel lisatud täitematerjali killustiku. Kui segamis protseduur lõppes oli antud betoonisegu kastususkõlbmatu (vt joonis 12).



**Joonis 12.** Ebaõnnestunud tekstiiljäätmekoguse ja betooni segamine.

Katsekehade valmistamise käigus selgus, et esialgse soovi järgi teha ümbertöödeldud tekstiiljäätmekogusega kolm seeriat katseid ebaõnnestus. Tekstiiljäätmekoguse variatsioon kogustega vastavalt 12 ja 18 kg/m<sup>3</sup> ebaõnnestus. Nagu jooniselt 12 on näha, siis on antud segu kasutamine katsete eesmärgil teostamatu. Kuna kogused 12 ja 18 kg/m<sup>3</sup> oleks muutunud betooni koostisosa ning antud katsekehasid poleks saanud omavahel võrrelda. Seeriates, kus ümbertöödeldud tekstiiljäätmekogused olid 12 ja 18 kg/m<sup>3</sup>, ei suutnud ümbertöödeldud tekstiiljäätmekogused betooniga seguneda. Seetõttu jäeti kaks seeriat katsekehasid valmistamata. Kõik seeriad tähistati vastava grupi märgistustega ning iga seeria katsekehasid nummerdati ühest viieni (tabel 5).

**Tabel 5.** Paindekatskehade andmed

Märgistus	Kogus	Valamise kuupäev	Vette panemise kuupäev	Tekstiilijäätmete kogus kg/m <sup>3</sup>	Tekstiilijäätmed	Sarrus
Seeria E (E1-E5)	5	30.03.2021	31.03.2021	-	-	2Ø8
Seeria T (T1-T5)	5	30.03.2021	31.03.2021	6	Tekstiilitolm	2Ø8
Seeria TJ (TJ1-TJ5)	5	30.03.2021	31.03.2021	6	Ümbertöödeldud tekstiilijäätmed	2Ø8
Seeria PP (PP1-PP5)	5	30.03.2021	31.03.2021	6	Polüpropüleenkiud	2Ø8

Peale katskehade kuivamist, transporditi katskehad AS TMB Element tootmistsehhist Eesti Maaülikooli ehituskonstruksioonide laborisse, kus neid hoiti niiskes keskkonnas 30 päeva.

### 3.2. Survekatskehade valmistamine

Survekats katskehade mõõtmete valikul lähtuti standardist EVS-EN 12390-1:2012 [28], mille alusel tulid katsekuubikute mõõtmeks 150×150×150 mm. Antud mõõtmed vastavad ka standardis EVS-EN 12930-3:2009 [29] olevatele nõutele katskehade mõõtmete osas survetugevuse katsetamisel. Katskehade jaoks vajalikud vormid saadi AS TMB Element tootmistsehhist. Vormi nakkumise vältimiseks kaeti kuubiku sisepind õhukese kihi mineraalõliga. Tekstiilijäätmete segamiseks betooniga kasutati segumikserit (joonis 11). Segumikserisse lisati AS TMB Elementi poolt saadud betoon C35/45, kuhu seejärel lisati juurde tekstiilijäätmekuid ning töödeldi kuni täieliku segunemiseni. Betoonisegu valati vastava standardi järgi 150×150×150 mm vormidesse (vt lisa 1). Betooni tihendamiseks kasutati nuivibraatorit. Seejärel lasti katskehadel üks ööpäev kivistuda ning eemaldati vormidest (lisa 1). Korraga valati üks seeria katskehaid. Katskehaid oli kokku neli seeriat ning ühes seerias kolm katsekeha. Katskehades kasutati kolme erinevat tüüpi tekstiilijäätmekuid. Kõik seeriad tähistati vastava grupi märgistustega ning iga seeria katskehad nummerdati (tabel 6).



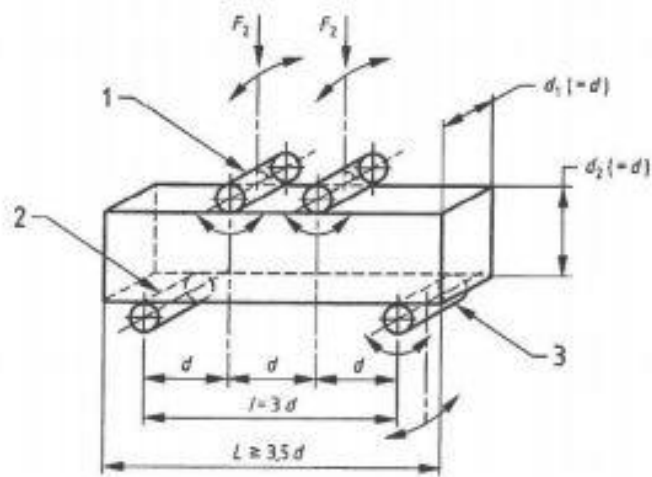
**Tabel 6.** Survekatsekehade andmed

Märgistus	Kogus	Valamise kuupäev	Vette panemise kuupäev	Tekstiiljäätmete kogus kg/m <sup>3</sup>
Seeria E (E1-E3)	3	30.03.2021	31.03.2021	-
Seeria T (T1-T3)	3	30.03.2021	31.03.2021	6
Seeria TJ (TJ1-TJ3)	3	30.03.2021	31.03.2021	6
Seeria PP (PP1-PP3)	3	30.03.2021	31.03.2021	6

Peale kivistumist transporditi katsekehad AS TMB Element tootmistsehhist Eesti Maaülikooli ehituskonstruksioonide laborisse, kus katsekehasid hoiti niiskes keskkonnas 30 päeva.

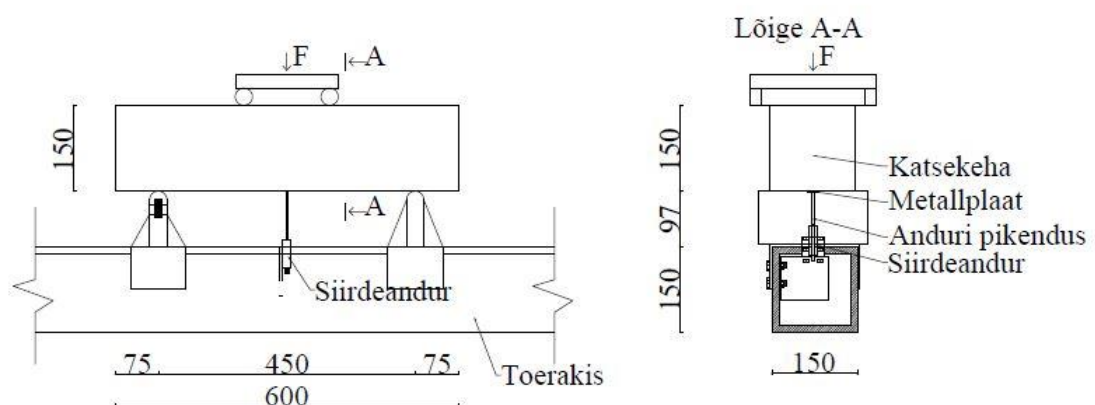
### 3.3. Paindekatse käik

Katsete tegemisel lähtuti EVS-EN 12390-5:2019 standardist [30]. Katse põhimõte on rakendada prismakujulisele katsekehale paindemoment, koormates seda ülemiste ja alumiste terasest rullide kaudu. Registreeritakse suurim vastuvõetav koormus ning arvutatakse paindetõmbetugevus. Katsetamisel kasutati Eesti Maaülikoolis ehitusmaterjalide laboris olevat kalibreeritud katsemasinat Π-125. Koormamisseade (joonis 13) peab koosnema neljast rullist, millest kaks on tugirullid ning kaks ülemist rulli, mida ühendav vahelüli jaotab rakendatud jõu ühtlaselt mõlema rulli vahel. Rullid peavad olema terasest ja ringikujulise ristlõikega, mille läbimõõtudeks on 20 kuni 40 mm. [30] Rullid peavad olema pikemad kui katsekeha laius ning peavad ületama katsekeha laiust vähemalt 10 mm võrra. Kahel ülemisel ja ühel alumisel rullil peab olema võimalus pöörata ümber oma telje ja katsekeha pikitelje risttasapinnas. Välimistel rullidel peab telgede vahe olema 3d, kus d tähistab katsekeha laiust [30]. Ülemiste rullide vahekaugus peab olema d. Ülemised rullid peavad asetsema alumiste rullide suhtes võrdsete vahedega (joonis 11). Rullid tuleb sättida joonise 11 järgi ning korrektse katsetulemus saamiseks peab nende täpsus olema  $\pm 2$  mm [30].



**Joonis 13.** Paindekatsekehade koormamisskeem. [30]

Paindekatsete mõõtmiseks kasutati siirdeandurit, mis on ühendatud arvutiga. Katsetamisel saadud andmed salvestati arvutitarkvarga MTS. Läbipainde mõõtmiseks vajalik siirdeandur kinnitati rakise külge, mis paigaldati vastu katsekeha (joonis 14). Katsekehadel mõõdeti läbipainet kuni nelja millimeetri saavutamiseni. Nelja millimeetrise läbipaine juures fikseeriti tulemus. Peale seda eemaldati siirdeandur ning koormati katsekeha kuni purunemiseni.



**Joonis 14.** Katseskeem läbipainde mõõtmiseks [27].

Katsetamise käigus jälgiti, et katsekehad oleks masinasse paigutatud täpselt tsentreeritult, vastavalt standardile ja oleks kogu pikkuse ulatuses ühtlaselt koormatud ning kokku surutud. Ülemised rullid asetsevad üksteisest 150 mm ja alumised 450 mm kaugusel. Peale igat katset tuli katsemasinalt ja katsekeha rullidega kokkupuutuvatelt pindadelt eemaldada üleliigne lahtine betoon ja tolm. Tolm ja lahtised betooni tükid võivad mõjutada katse tulemusi.

Paindetõmbetugevus  $f_{cf}$  arvutatakse valemiga [30]:

$$f_{cf} = Fl/(d_1 d_2^2), \quad (3.1)$$

kus

$F$  on maksimaalne koormus N;

$l$  – tugirullide telgede vahe mm;

$d_1$  ja  $d_2$  – katsekeha ristlõike vastavalt laius ja kõrgus mm.

Paindetõmbetugevus esitatakse täpsusega 0,1 MPa.

### 3.4. Survekatse käik

Katsed viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN 12390-3:2019 [29]. Katsed survetugevuse määramiseks tehti Eesti Maaülikooli laboris. Survetugevust hinnati katsekehade purunemisel. Katsetamisel saadud tulemused ja paindediagramm salvestati arvutitarkvaraga MTS. Iga katsekeha kohta fikseeriti purustav jõud.

Survetugevuse  $f_c$  arvutamiseks kasutati järgnevat valemit EVS EN 12390-3:2019 standardist [29]:

$$f_c = F/A_c \quad (3.2)$$

kus

$F$  on suurim koormus njutonites N;

$A_c$  - katsekeha ristlõikepind millele survejõud mõjub mm<sup>2</sup>.

Enne katsete alustamist tuli veenduda, et katsemasina pinnad ja katsekeha oleksid puhtad. Katsekehal ei tohi olla küljes ei puru ega lahtiseid tükke, mis võiksid mõjutada katse tulemust. Seejärel asetati katsekeha koormamispinna keskele ning veenduti, et katsekeha oleks tsentris. Koormamisel valiti ühtlane koormamise kiirus ning koormust suurendati ühtlaselt. Katsekehad koormati kuni purunemiseni. Peale katsekeha purunemist registreeriti katseseadme skaalalt maksimaalne näit ning kanti protokolli. Omavahel võrreldi ka katseseadme ning arvutiprogrammiga *MTS* saadud tulemusi.

Katsetest saadud survetugevuse väärtusi võrreldi standardis EVS-EN 206:2014+A2:2021 esitatud normväärtusega betooni C35/45 tugevusklassiga (tabel 7) [31].

**Tabel 7.** Survetugevusklassid kuubiliste katsekehade korral [31].

Survetugevusklass	Kuubiliste katsekehade minimaalne normsurvetugevus $f_{ck}$ N/mm <sup>2</sup>
C8/10	10
C16/20	20
C20/25	25
C25/30	30
C30/37	37
C35/45	45

## 4. KATSETULEMUSED JA ARUTELU

### 4.1. Paindekatskehade läbipainded

Käesoleva töö eesmärk oli uurida tekstiilijäätmete mõju klaasplastsarrusega betoonist talade paindetugevusele ja läbipaindele. Katsetes kasutati erinevaid purustatud tekstiilijäätmeid. Katsekäik algas katsekehade mõõtmisega. Saadud tulemused on välja toodud järgnevas tabelis( vt lisa 2).

Katsekehadele lisati klaasplastsarrust, et oleks neid hiljem võimalik võrrelda klaasplastsarrusega katsetel saadud tulemustega. Klaasplastsarrusega kaitsekihiks valiti 30 mm. Katsetel saadud läbipainded fikseeriti nelja millimeetrini. Läbipaindeid võrreldi koormustel 12,5; 25; 37,5; 59; 62,5; 75 ja 87,5 kN (tabelid 8-11). Kõikide seeriade kohta koostati paindediagrammid (joonised 15-18).

**Tabel 8.** Tekstiilijäätmeteta (seeria E) katsekehade läbipainded sõltuvalt koormusest

Katsekehade tähis	Koormus kN							Koormus kN 4 mm korral
	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	
Koormusele vastav läbipaine mm								
E1	0,019	0,094	0,446	1,152	1,576	2,094	3,198	97,5
E2	0,012	0,059	0,556	1,362	2,440	3,149	3,900	90,0
E3	0,002	0,069	0,740	1,167	2,077	2,653	3,327	95,0
E4	0,041	0,118	0,517	1,209	2,107	2,867	3,874	90,0
E5	0,001	0,067	0,690	1,535	2,915	3,859	-	78,8
Keskmine	0,015± 0,014	0,081± 0,021	0,590± 0,109	1,29± 0,146	2,220± 0,443	2,920± 0,581	3,570± 0,316	90,3±6,4

**Tabel 9.** Tekstiilitolmuga (seeria T) katsekehade läbipained sõltuvalt koormusest.

Katsekehade tähis	Koormus kN							Koormus kN 4 mm korral
	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	
Koormusele vastav läbipaine mm								
T1	0,045	0,120	0,602	1,373	2,269	3,966	-	76,3
T2	0,010	0,053	0,521	1,307	1,877	2,796	4,828	80,0
T3	-	-	-	-	-	-	-	51,3
T4	-	-	-	-	-	-	-	52,5
T5	0,006	0,081	0,550	1,344	1,954	3,396	4,969	75,0
Keskmine (T1,T2,T5)	0,020±0,018	0,085±0,027	0,558±0,03	1,341±0,027	2,03±0,170	3,386±0,478	4,899±0,071	77,1±2,1

**Tabel 10.** Ümbertöödeldud tekstiilijäätmetega (seeria TJ) katsekehade läbipained sõltuvalt koormusest.

Katsekehade tähis	Koormus kN							Koormus kN 4 mm korral
	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	
Koormusele vastav läbipaine mm								
TJ1	0,052	0,207	0,905	1,654	2,652	3,499	4,334	81,3
TJ2	0,008	0,084	0,493	0,887	1,866	3,808	6,356	76,3
TJ3	0,028	0,082	0,158	0,716	1,615	2,411	3,201	90,0
TJ4	0,014	0,118	0,206	1,452	3,321	5,200	8,757	67,5
TJ5	0,018	0,062	0,133	0,929	1,342	2,183	2,807	107,8
Keskmine	0,024±0,002	0,110±0,051	0,380±0,296	1,130±0,360	2,160±0,727	3,420±1,083	5,090±2,209	84,6±13,7

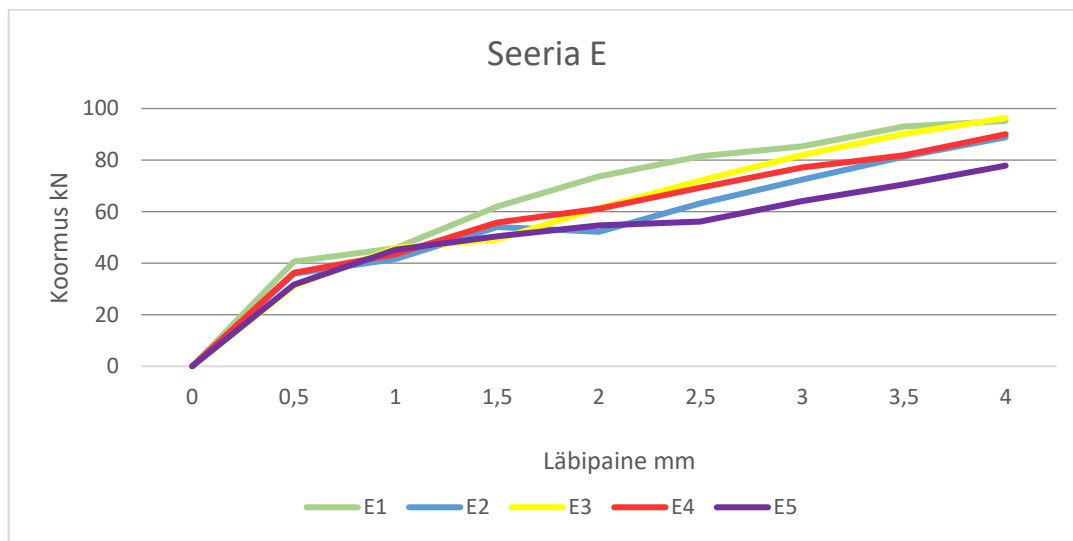
**Tabel 11 .** Polüpropüleenkiuga (seeria PP) katsekehade läbipainded sõltuvalt koormusest.

Katsekehade tähis	Koormus kN							Koormus kN 4 mm korral
	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	
Koormusele vastav läbipaine mm								
PP1	0,015	0,083	0,406	1,095	1,705	2,631	3,363	95,0
PP2	0,014	0,085	0,735	1,761	2,804	3,892	4,990	75,0
PP3	0,014	0,078	0,486	1,574	2,453	3,459	4,497	81,3
PP4	0,014	0,088	0,490	0,950	2,450	3,420	4,480	83,8
Keskmine	0,014±0,001	0,083±0,004	0,529±0,12	1,345±0,333	2,353±0,400	3,351±0,454	4,333±0,594	83,8±7,2

Paindediagrammid, mis on esitatud antud peatükis, on kujutatud erinevate purustatud tekstiilijäätmetega tugevdatud kolme kuni viie katsekeha läbipaine erinevate koormuste korral. Katsekehade arvu erinevus tuleneb sellest, et MTS programmiga salvestatud katsete tulemusi ei saadud arvutisüsteemist kätte. Seetõttu on seeria T3 ja T4 katsekehadest on ainult andmed 0,9 mm läbipainde, nelja millimeetrise koormuse ning purustava koormuse kohta, mis lisaks programmile pandi ka käsitsi kirja. Kõikide katsekehade purunemine toimus tugede juures, mis aga näitab põikjõukandevõime ületamist. Kui valmistatud katsekehad enam koormusi vastu võtta ei suuda, siis kandub koormus sarrusele ja tekstiilijäätmetele ning sellest tuleneb ka katsekehade läbipainete erinevus.

Katsekehade valmistamisel kasutati 2×ø8 klaasplastsarrust, mille kaitsekihiks oli 30 mm. Katsekehade valmistamisel muudeti aga tekstiilijäätmete sisaldust. Suured kõikumised seeria E katsekehade läbipaindes 12,5 kN suuruse koormuse juures võivad tuleneda katsetaja ebapädevusest. Nimelt katsekeha koormati käsitsi ja ühtlane koormus kiirus suudeti fikseerida umbes 10,0 kN juures. Seerias E tekstiilijäätmeid ei lisatud, kus fikseeriti tulemus nelja millimeetrisel läbipainde saavutamisel. Jooniselt on näha, et esimene pragu betoonis tekib 0,5 mm läbipainde juures. Koormuse kasvamisel kuni nelja millimeetrise läbipaindeni suuremaid purunemisi ei toimu. Katsekehad saavutasid nelja millimeetrise läbipainde korral

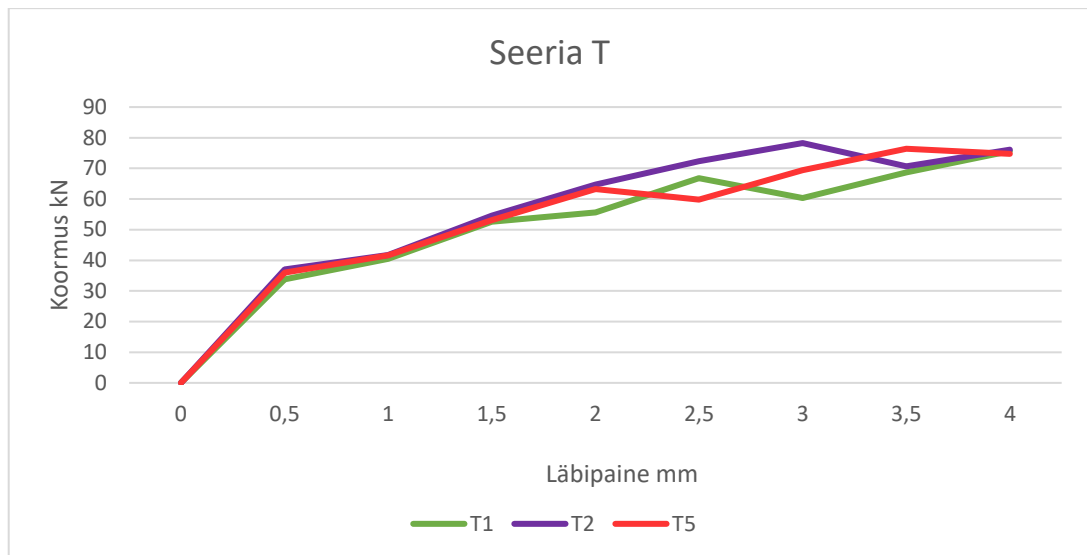
koormuste tulemusteks 78,8 kuni 97,5 kN. Keskmiseks koormuseks saadi  $90,3 \pm 6,4$  kN (vt joonis 15).



**Joonis 15.** Tekstiilijäätmeteta (seeria E) katsekehade paindediagrammid.

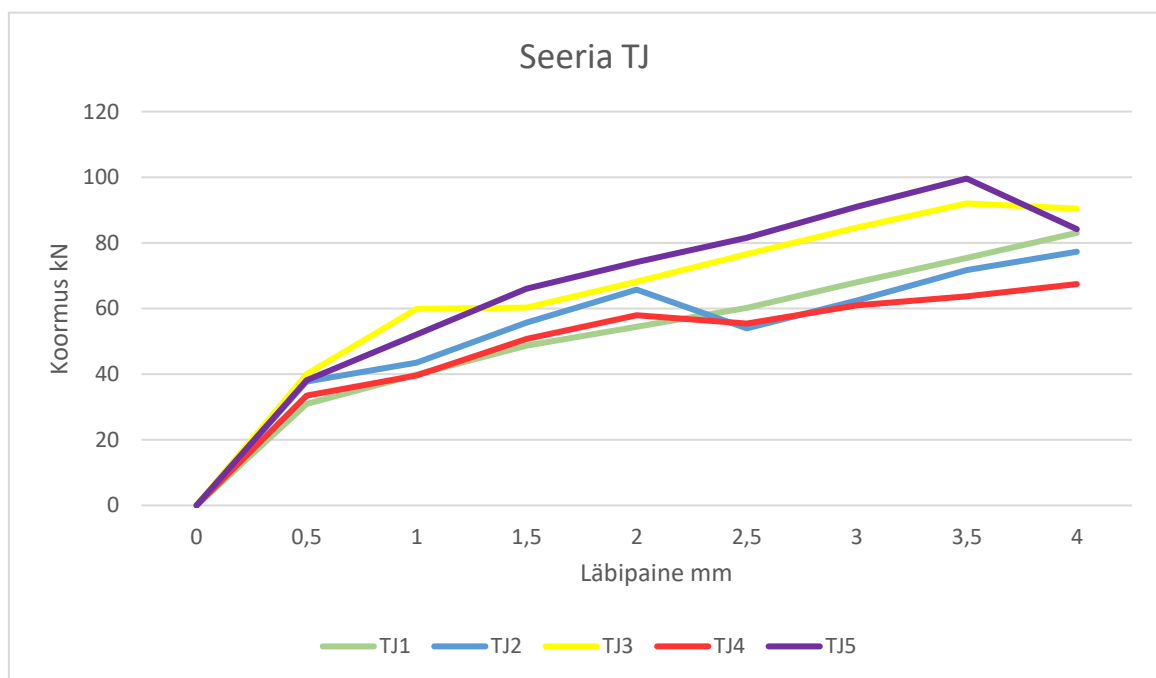
Seerias T, kuhu lisati lisaks  $2 \times \varnothing 8$  klaasplastsarrusele tekstiilijäätmetest tulenevat tekstiilitolmu. Jooniselt näeme juba 0,5 mm läbipaine juures suurt erinevust. Kolm katsekeha (T1,T2,T5) saavutasid 0,5 mm läbipainde 30,0-40,0 kN suuruse koormuse juures. Katsekehad (T3,T4) saavutasid läbipainde aga juba enne 20,0 kN suurust koormust. Katsekehad, mis saavutasid 0,5 millimeetrise läbipainde enne 20,0 kN, nendel kuni 4 millimeetrise läbipaindeni suuremaid purunemisi ja mõranemisi ei tekkinud. Antud seeria koormused 4 mm läbipainde korral jäid vahemikku 52,50 kuni 80,0 kN. Tekstiiltolmu puhul jäi keskmiseks koormuseks  $77,1 \pm 2,1$  kN (vt joonis 16).





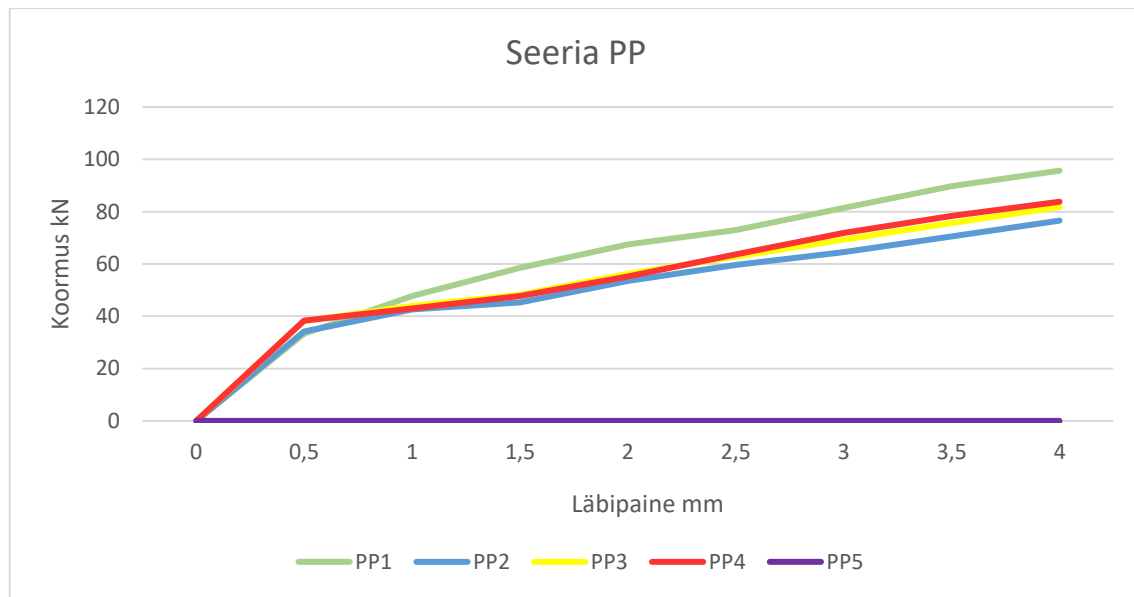
**Joonis 16.** Tekstiilitolmuga (seeria T) katsekehade paindediagrammid.

Ümbertöödeldud tekstiilijäätmete katseseerias jäid koormused nelja millimeetrise läbipaindel vahemikku 76,3 kuni 107,5 kN. Koormuste keskmiseks tulemuseks jäi  $83,3 \pm 13,7$  kN (vt joonis 17).



**Joonis 17.** Ümbertöödeldud tekstiilijäätmetega (seeria TJ) paindediagrammid.

Viimasena oli vaatluse all eeldatavalt kõige tugevam tekstiili ehk polüpropüleenkiud. Joonistel 18 näeme, et antud seeria on kõikidest eelnevatest kõige ühtlasem ja stabiilsem.



**Joonis 18.** Polüpropüleenkiuga (seeria PP) katsekehade paindediagrammid.

Koormust ühtlaselt lisades, kasvas ka betoontala läbipaine ühtlaselt, äkilisi murdumisi ja purunemisi selles seerias ei esinenud. Antud seerias jäid koormused nelja millimeetrise läbipainde juures vahemikku 75,0 kuni 95,0 kN (joonis 18). Polüpropüleenkiu korral jäi koormuste keskmiseks tulemuseks  $83,4 \pm 7,6$  kN.

Katsete tulemusi vaadates saame järeldada, et nelja millimeetrise läbipainde saavutamiseni peavad kõige paremini vastu katsekehad, kus pole kasutatud tekstiilijäätmeid. Kõige vähem koormust suudab taluda seeria T katsekehad, mille tulemused jäävad vahemikku 52,5/75 kuni 80,0 kN. Keskmise koormuse tulemuseks saadi  $67,0/77,1 \pm 4,8/2,1$  kN. Seeriad, kus kasutatakse tekstiilijäätmetena polüpropüleenit ja polüestrit, jäävad samasse vahemikku.

## 4.2. Katsekehade survetugevus

Käesolevas töös uuriti lisaks paindetugevusele tekstiilijäätmetega segatud betooni survetugevust. Varasemad uurimused näitasid, et tekstiilijäätmete lisamine betooni survetugevust ei paranda. Antud väide sai ka tõestust, sest katsete tulemusest on näha, et ilma tekstiilijäätmeteta katsekehad, seeria E, purunesid kõige suurema survejõu all, 89,6 kuni 104,8 kN (tabel 12). Tekstiilijäätmetega segatud betooni tulemused (tabelid 13-15) olid kõik sarnases vahemikus.

**Tabel 12.** Tekstiilijäätmeteta (seeria E) katsekehade survekatse tulemused.

Katsekeha tähis	Katsekeha mõõtmed mm		Purustav jõud $F_c$ kN	Survetugevus N/mm <sup>2</sup>
	Kõrgus a mm	Laius b mm		
E1	150	150	89,6	39,8
E2	151	150	104,8	46,3
E3	150	150	99,0	44,0
Keskmine	150,3±0,5	150,0±0	97,8±6,3	43,4±2,7

**Tabel 13.** Tekstiilitolmuga (seeria T) katsekehade survekatse tulemused.

Katsekeha tähis	Katsekeha mõõtmed, mm		Purustav jõud $F_c$ kN	Survetugevus N/mm <sup>2</sup>
	Kõrgus a mm	Laius b mm		
T1	149	150	85,9	38,4
T2	151	150	79,2	35,0
T3	151	149	77,6	34,5
Keskmine	150,3±0,9	149,7±0,5	80,9±3,6	36,0±1,7

**Tabel 14.** Ümbertöödeldud tekstiilijäätmetega (seeria TJ) katsekehade survekatse tulemused.

Katsekeha tähis	Katsekeha mõõtmed, mm		Purustav jõud $F_c$ kN	Survetugevus N/mm <sup>2</sup>
	Kõrgus a mm	Laius b mm		
TJ1	150	150	99,7	44,3
TJ2	150	150	95,7	42,5
TJ3	150	149	88,6	39,6
Keskmine	150±0	149,7±0,5	94,8±4,6	42,2±1,9

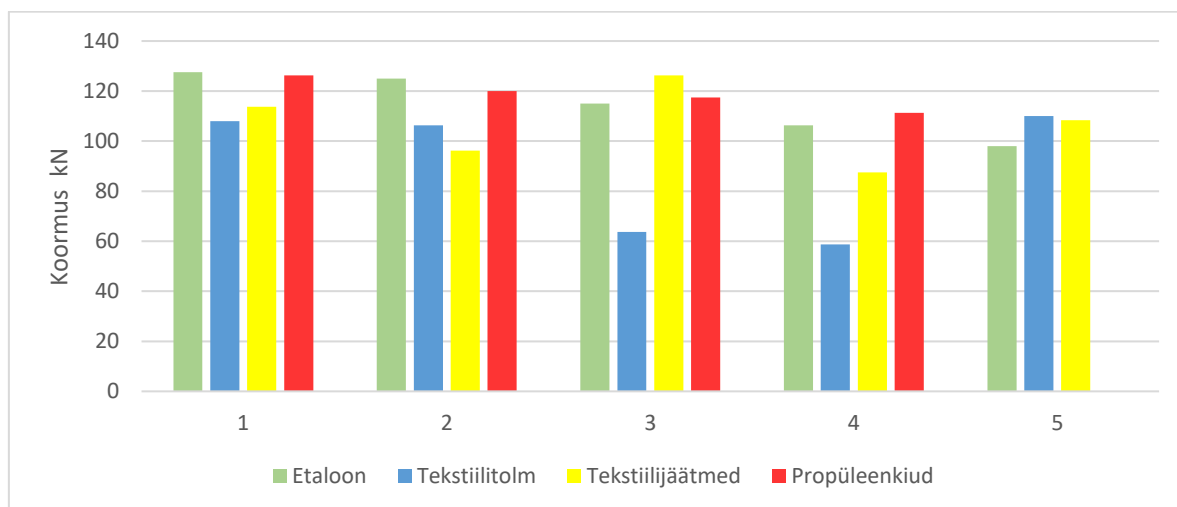
**Tabel 15.** Polüpropüleenkiuga (seeria PP) katsekehade survekatse tulemused.

Katsekeha tähis	Katsekeha mõõtmed, mm		Purustav jõud $F_c$ kN	Survetugevus
	Kõrgus a mm	Laius b mm		N/mm <sup>2</sup>
PP1	148	150	79,2	35,7
PP2	151	150	83,4	36,8
PP3	149	151	82,2	36,5
Keskmine	149,3±1,2	150,3±0,8	81,6±1,8	36,3±0,6

Survetugevuse määramine toimus EMÜ laboratooriumis 30.04.2021. Kui kasutada betooni survetugevusklassiga C35/45, siis kuubiliste katsekehade minimaalne normsurvetugevus on 45 N/mm<sup>2</sup>. Survetugevuse katsete tulemusest võib aga välja lugeda, et tekstiilijäätmatega segatud betoon survetugevuse normi ei täida. Katsekehasid ühes seerias oli küll vähe aga ühegi katse tulemused normi piiri ei täitnud. Kõige madalamad tulemused tulid seeriates T ja PP, tulemused jäid vastavalt vahemikku 36,0±1,7 ja 36,3±0,6 N/mm<sup>2</sup>.

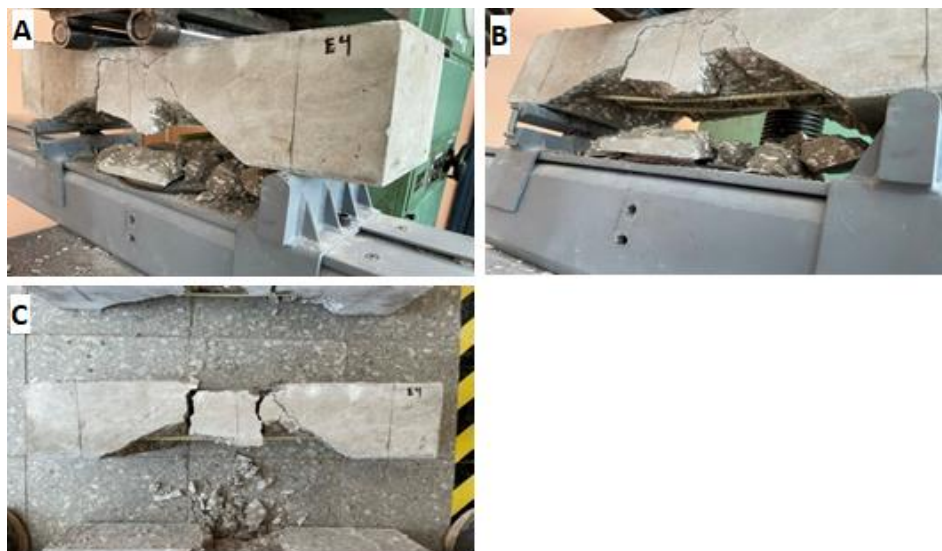
### 4.3. Paindekatekehade purunemisviisid

Purunemisviisi leidmiseks koormati katsekehasid kuni nende purunemiseni. Purustavad jõud jäid vahemiku 58,8 kuni 127,5 kN. Katsekehad purunesid erinevatel koormustel, mis suuresti sõltus betooni lisatud tekstiilijäätmete liigist (vt joonis 19).



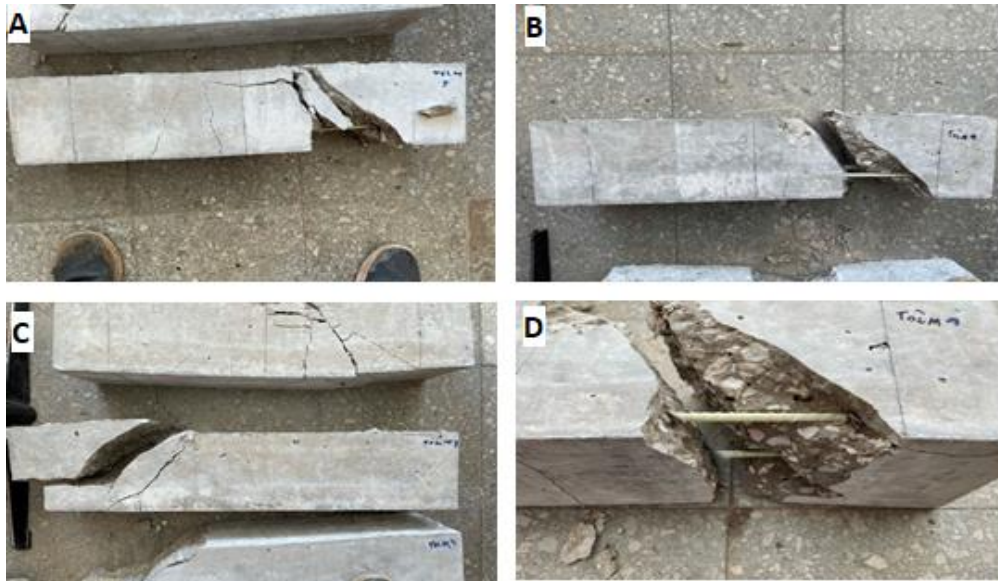
**Joonis 19.** Purunemisel saavutatud koormus.

Seeria E katsekehad, kus lisati ainult klaasplastsarrus kaitsekihiga 30 millimeetrit (joonis 20). Katsekehad pidasid vastu koormusi 98,0 kuni 127,5 kN enne täielikku purunemist. Purunemispildilt näeme, et katsekehad purunesid alumiste tugede vahelt ainult kaitsekihi osas. Mõlemad vardad jäid terveks ning ülemiste ja alumiste tugede vahele mõra ei tekkinud. Kuid katsekeha alumiste tugede vaheline kaitsekihi osa purunes täielikult.



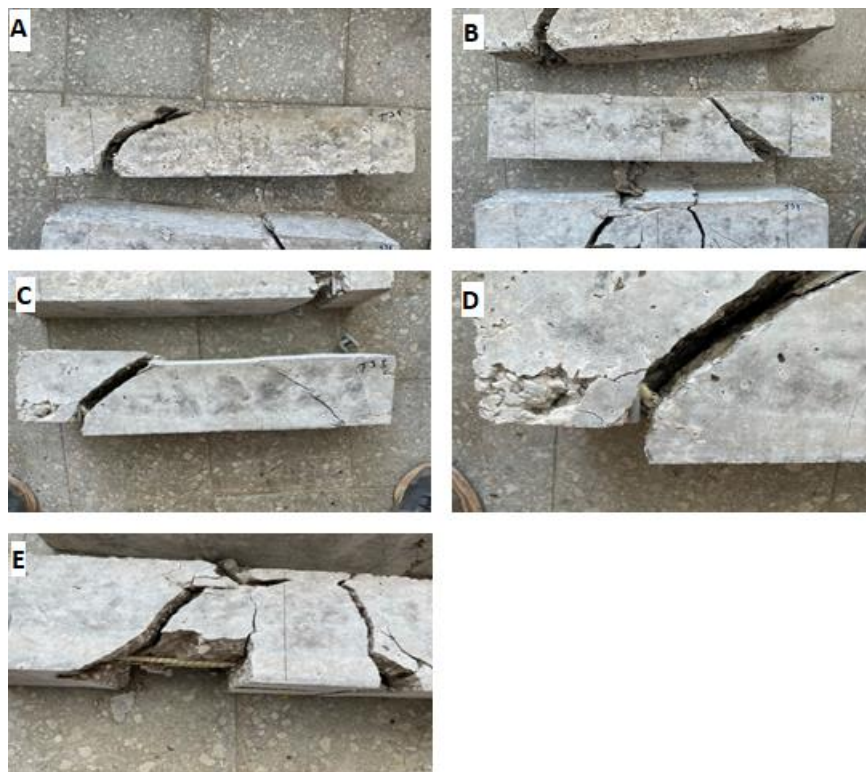
**Joonis 20.** Tekstiilijäätmeteta (seeria E) katsekehade purunemispildid.

Järgmisena katsetati tekstiilijäätmetest tekkinud tolmuuga segatud katsekehasid. Selle seeria katsekehad pidasid vastu koormust 58,8 kuni 110,0 kN. Koormuste suurt kõikumist, võib tõlgendada tekstiilijäätmete segamise raskusest. Kõik katsekehad purunesid sarnaselt (joonis 21), välja arvatud katsekeha number 3 (joonis 21, osa c). Seeria esimene katsekeha oli ainuke, millel purunes ka üks sarrustest. Katsekehade purunemispiltidelt näeme, et kõigil on tekkinud üks diagonaalne mõra ülemise toe juurest kuni alumise toeni, mille tulemusel katsekeha purunes.



**Joonis 21.** Tekstiilitolmuga (seeria T) katsekehade purunemispildid.

Seeria TJ, kus betooni segati ümbertöödeldud tekstiilijäätmetega. Katsekehad 1 ja 3 (joonis 22, osa a ja b), mis purunesid ühe ülemise toe juurest diagonaalselt alumise toeni.

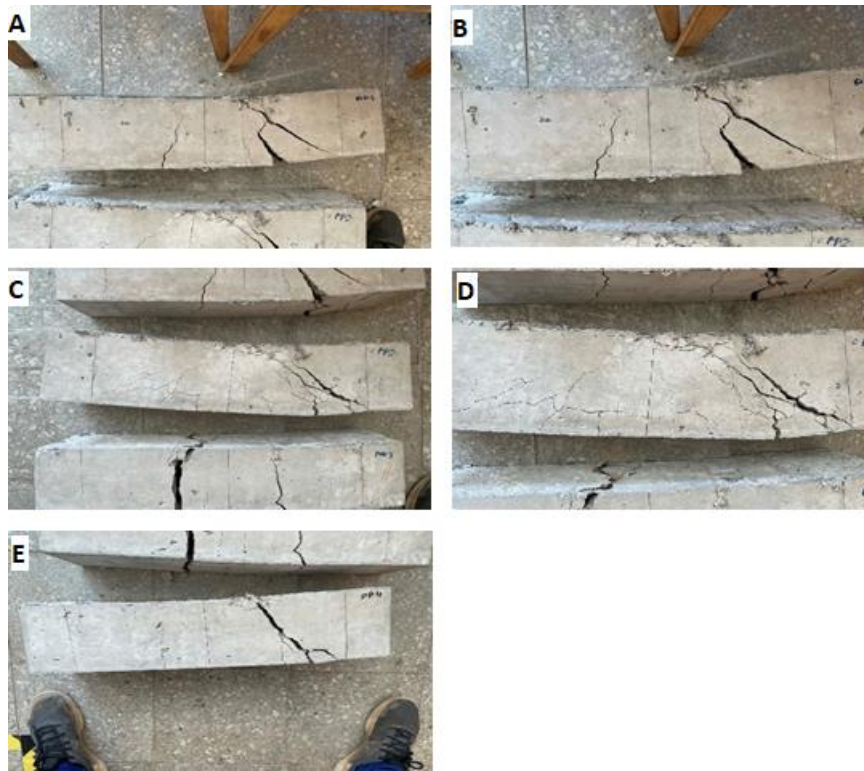


**Joonis 22.** Ümbertöödeldud tekstiili jäätmetega (seeria TJ) katsekehade purunemispildid.

Ülejäänud seeria katsekehad purunesid aga mõlemalt poolt. Mõlema ülemise toe juurest diagonaalselt alumise toeni. Katsekehad purunesid koormusel 87,5 kuni 126,3 kN. Koormuste suurt kõikumist võib tõlgenda tekstiilijäätmete segamise raskusest. Esimene ja

kolmas katsekeha pidasid kõige kauem vastu ning nendel katsekehadel purunes üks sarrustest. Teistel katsekehadel sarrused ei purunenud.

Viimasena on vaatluse all polüpropüleenkiuga segatud betooni purunemine (joonis 23). Enne katsetamist oli teada, et antud kiud on tekstiilide mõistes kõige tugevam.



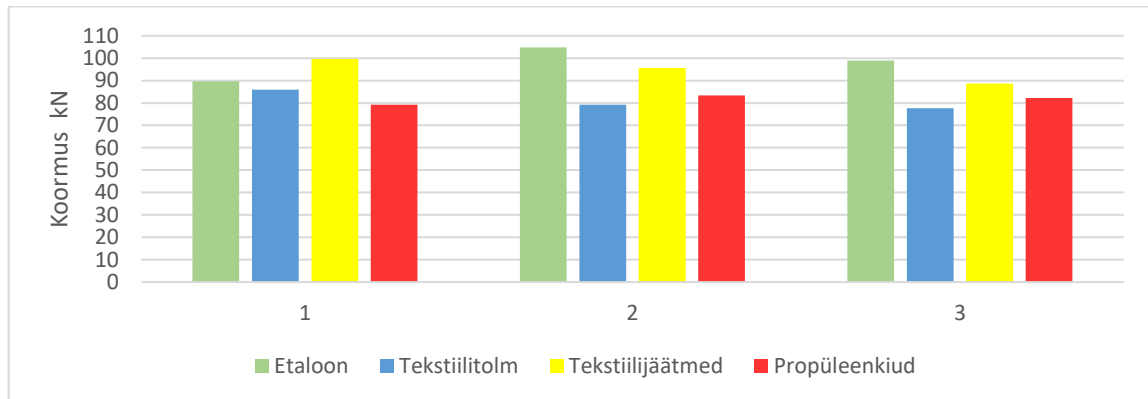
**Joonis 23.** Polüpropüleenkiuga (seeria PP) katsekehade purunemispildid.

Katsekehad, mis pidasid koormusele kõige paremini vastu, purunedes alles koormuse vahemikus 111,3 kuni 126,3 kN. Katsekehadel lisatud kiud olid piisavalt tugevad, et suutsid ka peale purunemist betooni siduvuse tagada. Antud katsekehade seeria on ainuke, kus katse käigus suuri betoontükke ei eraldunud (joonis 23). Seeria, kus katsekehade purunemispildid olid üsna sarnased. Esimene mõra tekkis kahe ülemise toe vahel, ning teine mõra liikus diagonaalselt ülemisest toest alumise toeni. Antud seerias sarrused ei purunenud ega nihkunud.



#### 4.4 Survekatsekehade purunemisviisid.

Purunemisviisi leidmiseks koormati kuubikust katsekehasid seni kuni katsekehad koormust taluda suutsid. Purustavad jõud jäid vahemiku 58,8 kuni 127,5 kN. Katsekehad purunesid erinevatel koormustel, mis suuresti sõltus betooni lisatud tekstiilijäätmete liigist (joonis 24).

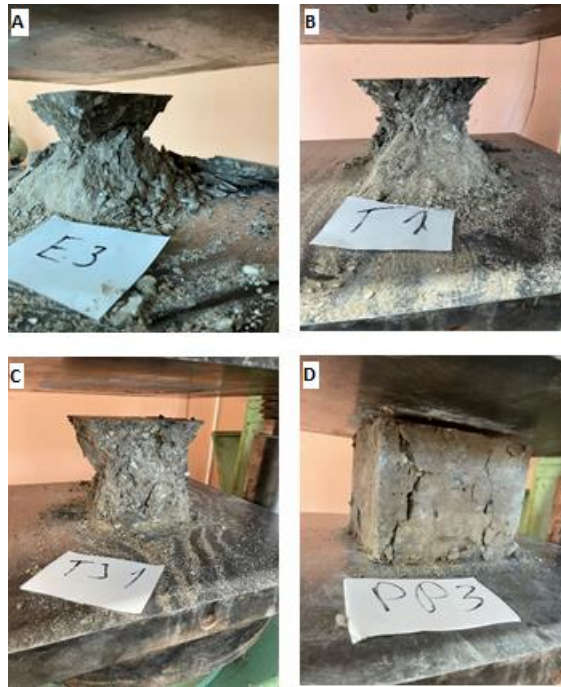


**Joonis 24.** Survekatse kehade purunemispärad.

Joonis 24 näeme, et katsetus seeriad jagunevad pooleks. Kaks seeriat, mis suutsid kõige paremini koormust vastu võtta jäävad samasse vahemikku. Samuti ka kaks kõige kehvemat seeriat jäid samasse vahemikku. Maksimaalse tulemuse saavutas katsekeha E1, kuhu tekstiilijäätmeid ei lisatud, koormuse tulemuseks 104,9 kN. Kõige kehvemini suutis koormust kuni purunemiseni vastu võtta katsekeha T3, kus lisa täitematerjalina kasutati tekstiilitolmu  $6 \text{ kg/m}^3$  kohta ning vastu suutis võtta koormust kuni 77,6 kN.

Kõige rohkem koormust suutsid vastu võtta katsekehad kuhu tekstiilijäätmeid ei lisatud ja katsekehad kuhu lisati ümbertöödeldud tekstiilijäätmeid (polüester). Katsekehad, mille valmistamisel kasutati tekstiilist tulenevat tolmu ja polüpropüleenkiudu, suutsid kõige vähem koormust taluda. Joonisel 25 on välja toodud mõned katsekehade purunemispildid.





**Joonis 25.** Näited katsekehade purunemispiltide kohta.

Purunemis piltidel on näha, et seeria E, T ja TJ katsekehad purunesid sarnaselt ning vastavalt nõuetele. Katseseerias, kus kasutati polüpropüleen kiude ei saanud autor korralike purunemispilte teha. Nimelt korrektse purunemis pildi jaoks oleks pidanud kasutama lisavahendeid betooni tükide eemaldamiseks. Kuna peale oma maksimumi survetugevuse saavutamist keha täielikult ei purunenud. Polüpropüleen kiud suutsid purunenud ja üksteisest eemaldunud betooni tükke endiselt koos hoida.

## 4.5 Paindetõmbetugevus ja lubatud läbipaine

Katsetetulemustes võime järeldada, et kõige kehvema ning ebaühtlasema tulemuse andis seeria T katsekehad, kus koormused jäid vahemikku 58,8 kuni 110,0 kN (tabel 17). Need on antud eksperimendi kõige madalamad tulemused ning parimast tulemusest on need ligikaudu 50% kehvemad. Kõige suurema tugevusega katsekehad olid ilma tekstiilijäätmeteta ja polüpropüleenkiuga katsekehad. Kõige ühtlasemad tulemused saadi seerias PP, kus kasutati polüpropüleenkiude (tabel 19). Antud seerias saadi purunemiseks vajav koormuse keskmiseks tulemuseks  $119,1 \pm 5,4$  kN. Paindetõmbetugevuse kõige paremad tulemused saadi samast seerias ehk seeria PP. Polüpropüleenkiuga tugevdatud katsekehade keskmiseks

paindetõmbetugevuseks saadi koormus  $15,8 \pm 0,7$  kN. Seejärel tuli seeria E, mis oli väga sarnane seeria PP-le, kuid tulemused olid ainult 2% kehvemad (tabel 16). Järgmiseks seeriaks oli TJ, kus kasutati ümbertöödeldud tekstiilijäätmeid (polüester). Polüestriga valmistatud katsekehad tulemused erinesid kõige paremast paindetõmbetugevusest 25% (tabel 18). Kõige kehvema tulemuse andis seeria, kus betoonile lisati tekstiilijäätmete töötlemisest tulenevat tekstiilitolmu.

**Tabel 16.** Tekstiilijäätmeteta (seeria E) katsekehade purustav koormus ja paindetõmbetugevus

Katsekehade märgistus	Koormus kN	Paindetõmbetugevus MPa
E1	127,5	17,0
E2	115,0	15,3
E3	125,0	16,7
E4	118,5	15,8
E5	98,0	13,0
Keskmine	$116,8 \pm 10,4$	$15,6 \pm 1,4$

**Tabel 17.** Tekstiilitolmuga (seeria T) katsekehade purustav koormus ja paindetõmbetugevus

Katsekehade märgistus	Koormus kN	Paindetõmbetugevus MPa
T1	106,0	14,2
T2	106,6	14,3
T3	65,5	8,7
T4	59,8	7,9
T5	110,0	14,6
Keskmine	$89,6 \pm 22,1$	$11,9 \pm 3,0$

**Tabel 18.** Ümbertöödeldud tekstiilijäätmetega (seeria TJ) katsekehade purustav koormus ja paindetõmbetugevus.

Katsekehade märgistus	Koormus kN	Paindetõmbetugevus MPa
TJ1	114,0	15,2
TJ2	97,4	13,0
TJ3	126,5	16,5
TJ4	87,5	11,6
TJ5	108,4	14,3
Keskmine	106,8 ± 13,4	14,1 ± 1,7

**Tabel 19.** Polüpropüleenkiuga (seeria PP) katsekehade purustav koormus ja paindetõmbetugevus.

Katsekehade märgistus	Koormus kN	Paindetõmbetugevus MPa
PP1	126,5	16,8
PP2	120,0	16,1
PP3	118,5	15,5
PP4	111,4	14,9
PP5	-	-
Keskmine	119,1 ± 5,4	15,8 ± 0,7

Üheks töö eesmärgiks oli ka katse tulemuste võrdlemine eelneva tööga. Antud töös võrdleme katsetulemusi 2018. aastal Henry Maaski poolt tehtud magistritöö [27] tulemustega. Vaatluse all on katsekehad, kus eelpool nimetatu katsetas katsekehade purunemisele vajaminevat koormust ning paindetõmbetugevust ning samuti ka 0,9 mm läbipainde (lubatud) saavutamisel. Võrreldi Henry Maaski pool valmistatud seeria 2 katsekehadega, kus armeerimisel kasutati samuti 2×ø8 klaasplastsarrust ning betooni kaitsekihiks oli 30 mm [27]. Käesolevas töös saadud lubatud läbipaindele vastavad koormus ja paindetõmbetugevus on esitatud tabelis 20.

**Tabel 20.** Koormused ja paindetõmbetugevus lubatud (0,9 mm) läbipaindel

Katsekehade märgistus	Koormus kN	Paindetõmbetugevus MPa
E1	43,1	5,7
E2	44,7	5,9
E3	42,9	5,8
E4	39,9	5,3
E5	43,1	5,8
<b>Keskmine</b>	<b>42,7±1,6</b>	<b>5,7±0,2</b>
T1	36,6	4,9
T2	38,6	5,2
T5	39,0	5,2
<b>Keskmine</b>	<b>38,1±1,1</b>	<b>5,1±0,1</b>
TJ1	37,5	5,1
TJ2	50,4	6,7
TJ3	57,4	7,5
TJ4	45,3	6,1
TJ5	49,1	6,6
<b>Keskmine</b>	<b>47,9±6,6</b>	<b>6,4±0,8</b>
PP1	45,1	6,0
PP2	41,0	5,5
PP3	41,1	5,4
PP4	45,4	6,1
<b>Keskmine</b>	<b>43,2±2,1</b>	<b>5,8±0,3</b>

Eelnevas magistritöös [27] valati samuti ühe seeria jaoks viis katsekeha, kus saadi katsekehade purustavaks koormuseks keskmiselt  $114,0 \pm 48,19$  kN ning paindetõmbetugevuseks  $14,8 \pm 6,2$  MPa. Käesoleva töö parimad tulemused tulid katsekehadega, kus lisamaterjalina kasutati polüpropüleen kiude. Mille keskmiseks tulemuseks on  $119,1 \pm 5,4$  kN ja paindetõmbetugevuse keskmiseks tulemuseks  $15,8 \pm 0,7$  MPa (tabel 19). Tulemustest võib järeldada, et antud kiu lisamine parandab kuni purunemiseni betooni vastupanu koormusele ning paindetõmbetugevust. Lisaks parandab ka katsekehade omavahelist koormuse erinevuste kõikumist ehk katsekehad koormused jäävad kitsamasse vahemikku  $\pm 33$  kN.

Magistritöös [27] uuriti paindetõmbetugevust ka 0,9 mm lubatud läbipaindel. Võrreldi samuti seeria 2 katsekehadega, mis oli magistritöö viies tulemus. Katsekehad, kus armeerimisel kasutati  $2 \times \emptyset 8$  klaasplastsarrust saadi keskmiseks tulemuseks  $37,75 \pm 1,7$  kN. Antud töö suurim koormus 0,9 mm läbipaindel saavutati katsekehades, kus kasutati lisaks

täitematerjalina ümbertöödeldud tekstiilijäätmeid. Keskmiseks tulemusteks saadi  $47,9 \pm 6,6$  kN ning paindetõmbetugevuseks  $6,4 \pm 0,8$  MPa. Välja tuleb tuua ka see, et kõik katseseeriad ületasid magistritöös [27] saadud tulemust (tabel 20).

Katsetulemusi võrreldes võib järeldada, et tekstiilijäätmete lisamine parandab paindetõmbetugevust lubatud läbipaindel.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli ümbertöödeldud tekstiilijäätmete kasutamine betooni läbipainde ja survetugevuse parandamisel. Töö käigus tutvustati betooni ajalugu Eestis ja mujal maailmas. Lisaks anti ülevaade tekstiilijäätmete tekkele ning nendest tulenevate probleemide kohta. Tutvustati ka magistritöös kasutatavaid tekstiilikiude. Käesolevas töös tutvustati ka kahte Eesti ettevõtet, kes tegelevad tekstiilijäätmete taaskasutamisega, millest üks toodab kodutekstiili ja teine ehituses kasutatavaid paneele. Kuna tekstiilijäätmel on terasega võrreldes mitmeid kordi kergemad ja elastsemad, siis selgitati antud töös välja, kuidas käitub tekstiililisandiga betoon paindel ja survel. Otsiti vastust ka küsimusele kas tekstiilijäätmete lisamine parandab betooni survetugevust. Seejärel analüüsiti katsetes saadud tulemusi.

Magistritöö katsetega võrreldi omavahel kolme erineva tekstiilijäätmega valmistatud betoonist tugevus- ja jäikusnäitajaid. Katsekehade valmistamisel tulid abiks AS TMB Element, kes andis katsekehade rakise jaoks vajavad materjalid ning katsetes vajamineva betooni. Antud katsete katsekehad valmistati AS TMB Elementi tootmistsehhis. Betoonisegud valmistati vastavalt tehase standardile, mille eeldavaks betooni tugevusklassiks oli C35/45. Katsetes kasutatavad tekstiilijäätmel saadi Viljandis asuvast ettevõttelt Paragon Sleep AS-lt. Katsekehade valmistamisel kasutati tekstiilijäätmel tekstkiivat tekstiilitolmu, purustatud ümbertöödeldud tekstiilijäätmel (polüester) ja polüpropüleenkiu tekstiilijäätmel. Kokku valmistati 32 katsekeha, millest 20 olid paindekatse ning 12 survekatse jaoks. Katsekehad transporditi Eesti Maaülikooli ehituskonstruktioonide laborisse, kus kehad asetati niiskesse keskkonda. Katsekehad kivinesid 30 päeva. Seejärel transporditi katsekehad Eesti Maaülikooli ehitusmaterjalide laborisse, kus fikseeriti katsekehade mõõdud ning määrati nende paindetõmbe- ja survetugevus.

Katsed näitasid, et tekstiilijäätmel betooni survetugevust ei paranda. Selles veendumiseks tehti lisaks paindekatsetele ka igale seeriale kolme 150×150×150 mm katsekeha survetugevuse mõõtmine. Katsetamise käigus veenduti, et käesolevas töös kasutatavad polüpropüleenkiust, polüestrist ja tekstiilitolmust koosnevad tekstiilijäätmel betooni

survetugevust ei paranda. Tulemustest näeme, et kõige parema tulemuse saavutas tekstiilijäätmeteta seeria, mille keskmiseks survetugevuseks tuli  $43,4 \pm 2,7$  MPa. Sellele järgnesid katsekehad, kuhu lisati ümbertöödeldud tekstiilijäätmeid (polüester), mille keskmiseks tulemuseks saadi  $42,2 \pm 1,9$  MPa. Kaks kõige kehvemad olid seeriad, kus lisamaterjalina kasutati tekstiilist tulenevat tolmu ja polüpropüleen kiude. Need katsete keskmised tulemused oli ligikaudu 7 MPa kehvemad kui ilma tekstiilijäätmeteta katsekehade keskmine tulemus. Võib järeldada, et korrektse katse tulemusteks, tuleks katsekehade arvu suurendada, kuna ühegi seeria keskmine tulemus ei täitnud betooni survetugevusklassiga C35/45 normi piiri. Küll võib aga välja tuua selle, et polüpropüleenkiu lisamine parandas betoonis tekkivate pragude levikut. Polüpropüleenkiududega tugevdatud betoonkuubikute purunemispildi jäädvustamisel tekkis raskusi, sest kiu tugeva elastsuse puhul püsis katsekeha endiselt ühes tükis.

Katsekehade paindetugevusele andis parima tulemuse tekstiilijäätmete polüpropüleen kiud ( $15,8 \pm 0,7$  MPa), millele järgnesid ümbertöödeldud tekstiilijäätmed ( $14,1 \pm 1,7$  MPa) ja tekstiilijäätmetest tulenev tekstiilitolm ( $11,0 \pm 3,0$  MPa). Polüpropüleeniga segatud katsekehade keskmine koormus nelja millimeetrise läbipainde juures jäi vahemikku  $83,4 \pm 7,6$  kN. Sellele järgnes ümbertöödeldud tekstiilijäätmetega katsekehad, mille tulemused olid polüpropüleen kiule väga lähedal, ning seeria TJ katsekehade keskmine tulemus jäi vahemikku  $83,3 \pm 13,7$  kN. Paindekatses puhul kõige kehvemad tulemused saime seeriast, kus katsekehadele lisati tekstiilitolmu. Tekstiilitolmuga katsekehade koormuse vastuvõtuvõime erines parimast seeriast ligikaudu 25%. Parima tulemuse nelja millimeetrise läbipainde juures saavutas seeria E, kus tekstiili lisamaterjalina ei kasutatud. Antud seeria paindetugevuse keskmine tulemus jäi vahemikku  $90,3 \pm 6,4$  kN.

Lubatud 0,9 millimeetrisel läbipaindel saime parimad tulemused katsekehadega, kus kasutati lisamaterjalina ümbertöödeldud tekstiilijäätmeid. Katsete keskmiseks tulemuseks saadi  $47,9 \pm 6,6$  kN ning paindetõmbetugevuseks  $6,4 \pm 0,8$  MPa. Paremuselt teine tulemus saadi katsekehadega, kus lisa täitematerjalina kasutati polüpropüleenkiude, mille keskmiseks koormuseks 0,9 mm läbipainde juures oli  $43,2 \pm 2,1$  kN. Polüpropüleenkiuga katsekehade keskmiseks paindetõmbetugevuseks oli  $5,8 \pm 0,3$  kN. Kõige kehvemad tulemused lubatud 0,9 mm läbipaindel tulid katsekehadega, kus kasutati tekstiilijäätmete töötlemisel tulenevat tekstiilitolmu. Katsetulemustest võib järeldada, et tekstiilijäätmete lisamine parandab paindetõmbetugevust lubatud läbipaindel.

Teaduskirjanduse uurimise käigus selgus, et kõige sagedamini kasutatav ja kõige paremate omadustega tekstiilikiuks peetakse polüpropüleenkiude. Katsetulemuste analüüsis sai antud väide kinnitust. Kõige paremad tulemused tekstiilijäätmetest tulid just eelpool nimetatud kiuga. Lisaks heale tulemusele oli ka ainuke katseseeria, kus katsekehadest peale masina alt eemaldamist betoonist tükke ei pudenenud. Polüpropüleenkiuga katsekehad olid ainukesed, mis peale koormuse kadumist, oma algset kuju ei taastanud. Katsekehadel oli võimalik silmaga eristada läbipainet.

Kõige kehvemad tulemused tulid tekstiili tolmuks, mille tulemuste erinevus oli ligikaudu 50%. Suurt tulemuste erinevust võib tõlgendada tekstiili tolmu ebaühtlases segunemises.

Rolli võib mängida tekstiilijäätmete segamistehnika, kuna polüestri kiududel on suur veeimavus ning selle segamine on raskendatud. Tekstiilijäätmeid segumasinas segades imab tekstiili kogu vee endasse, ning eraldame betooni täitematerjalina kasutatud killustiku.

Edasises uurimuses võiks proovida tekstiilijäätmeid eelnevalt millegagi segada või siis niisutada. Vältimaks segamisele tulenevaid raskusi võiks lisada vett aga see muudaks betooni koostist ja vesitsemist tegurit. Ühe lahendusena võiks edasisel uurimisel proovida tekstiilijäätmetest pikad sarrused valmistada. Tuleks leida parem viis kuidas tekstiilijäätmeid betooni ühtlasemalt ja paremini segada.



## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] **Gromicko, N., Shepard, K.** s.a The History of Concrete. – International Association of Certified Home Inspectors. [veebileht] - <https://www.nachi.org/history-of-concrete.htm> (01.02.2021)
- [2] The History of Concrete. (2017). Merlo Construction. [veebileht] <https://www.merloconstructionmi.com/the-history-of-concrete/> (01.02.2021)
- [3] **Pepin, R.** (2017). The History of Concrete. – Giatec. [veebileht] <https://www.giatecscientific.com/education/the-history-of-concrete/> (01.02.2021)
- [4] Rudus AS. s.a. - Betooni ajalugu. [veebileht] <https://rudus.ee/betoon/betooni-ajalugu/> (01.02.2021)
- [5] **Lige, C.D.** s.a Lennusadam. – KOKO arhitektid [veebileht] <http://koko.ee/et/project/121-seaplane-harbour> (01.02.2021)
- [6] **Naaman. A.E.** (2001) Encyclopedia of Materials: Science and Tehcnology ( Second Edition) – Reinforced Concrete. Volume 1, pp 8095-8109. [online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080431526014546>
- [7] Semtu. (s.a) Kiud. [veebileht] <https://www.semtu.ee/ee/tooted/kiud> (25.05.2021)
- [8] Rudus (s.a) Teraskiud. [veebileht] <http://www.kiudbetoon.ee/teraskiud.htm> (25.05.2021)
- [9] Rudus (s.a). Klaaskiud. [veebileht] <http://www.kiudbetoon.ee/klaaskiud.htm> (25.05.2021)

[10] Rudus (s.a) Polüpropüleenkiud. [veebileht] <http://www.kiudbetoonee.ee/polukiud.htm> (25.05.2021)

[11] **Jain, P., Gupta, C.** s.a. - The story of textile waste – Reasons and solutions. International Journal of Applied Home Science. Volume 5 (4). [veebileht] <http://scientificresearchjournal.com/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=3008> (14.04.2021)

[12] **Beall, A.** (2020) Why clothes are so hard to recycle. - *BBC* [e-ajakiri] <https://www.bbc.com/future/article/20200710-why-clothes-are-so-hard-to-recycle> (23.05.2021)

[13] Labfresh. (s.a) Fashion Waste Index. [veebileht] <https://labfresh.eu/pages/fashion-waste-index?locale=en&fbclid=IwAR2pLgMuBXAoWn3WL4RFUTttP4RXKHVUUw7LVU1daCBR2T8jc1mXHQVOaoM> (24.05.2021)

[14] **Caulfield, K.** (2009) Discussion paper – Sources of Textile Waste in Australia. [online] <https://studylib.net/doc/18791293/sources-of-textile-waste-in-australia> (14.04.2021).

[15] **Tuulik, D.** (2011). Sissejuhatus Tekstiilmaterjaliõpetusse: Üldandmed tekstiilikiududest [online] [https://eprints.tktk.ee/id/eprint/154/1/ldandmed\\_tekstiilkiududest.html](https://eprints.tktk.ee/id/eprint/154/1/ldandmed_tekstiilkiududest.html) (26.04.2021).

[16] **Tuulik, D.** (2011). Sissejuhatus Tekstiilmaterjaliõpetusse: Liigitus päritolu järgi. [online] [http://eprints.tktk.ee/154/1/liigitus\\_pritolu\\_jrgi.html](http://eprints.tktk.ee/154/1/liigitus_pritolu_jrgi.html) (28.04.2021).

[17] Rilon LTD. (s.a) (2020) Polypropylene Fiber: Main Characteristics, Application, Products and Structure. [veebileht] <https://rilonfibers.com/blog/polypropylene-fiber/> (18.05.2021).

[18] Concrete Construction Staff. (1983) Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers. [veebileht] [https://www.concreteconstruction.net/how-to/materials/concrete-reinforced-with-polypropylene-fibers\\_o](https://www.concreteconstruction.net/how-to/materials/concrete-reinforced-with-polypropylene-fibers_o) (05.05.2021).

[19] **Tuulik, D.** (2021) Sünteetilised kiud – Koolituspäev tekstiilikonserveerijatele ja muuseumitöötajatele. [online]

<https://evm.ee/uploads/files/Kanut/S%C3%BCnteetilised%20kiud%201.pdf> (17.05.2021)

[20] **Boliree.** (s.a) Materjalid. [veebileht] <https://boliree.weebly.com/materjalidest.html> (19.05.2021)

[21] Polymerdatabase. (2021) Polyester Fibers. [veebileht] <http://polymerdatabase.com/Fibers/Polyester.html> (19.05.2021)

[22] Construction Materials – made from recycled waste. (s.a). – Retex panels [veebileht] <https://retexpanels.com/> (03.05.2021)

[23] Retex panel. (s.a.) Retex panels. [veebileht] <https://retexpanels.com/products/retex-panel/> (03.05.2021)

[24] Paragon Sleep AS. (s.a.) Ettevõtte. [veebileht] <https://paragonsleep.com/ettevotte/> (03.05.2021)

[25] **Raba, R.** (2012). Toom Tekstiil rajab jäätmetööstuse. – *Sakala*. [e-ajakiri] <https://sakala.postimees.ee/986160/toom-tekstiil-rajab-jaatmetootlustehase> (04.05.2021)

[26] EVS-EN 12390-1:2012. (2012) Kivistunud betooni katsetamine, Osa 1: Kuju, mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded: Tallinn: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus.

[27] **Maask Henry.** 2018. Klaasplastsarrusega betoontalade läbipainde uurimine. Magistritöö. Eesti Maaülikool metsandus- ja maaehitus instituut. Tartu. 61lk.

[28] EVS-EN 12390-2:2019. (2019). Kivistunud betooni katsetamine, Osa 2: Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine. Tallinn: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus.

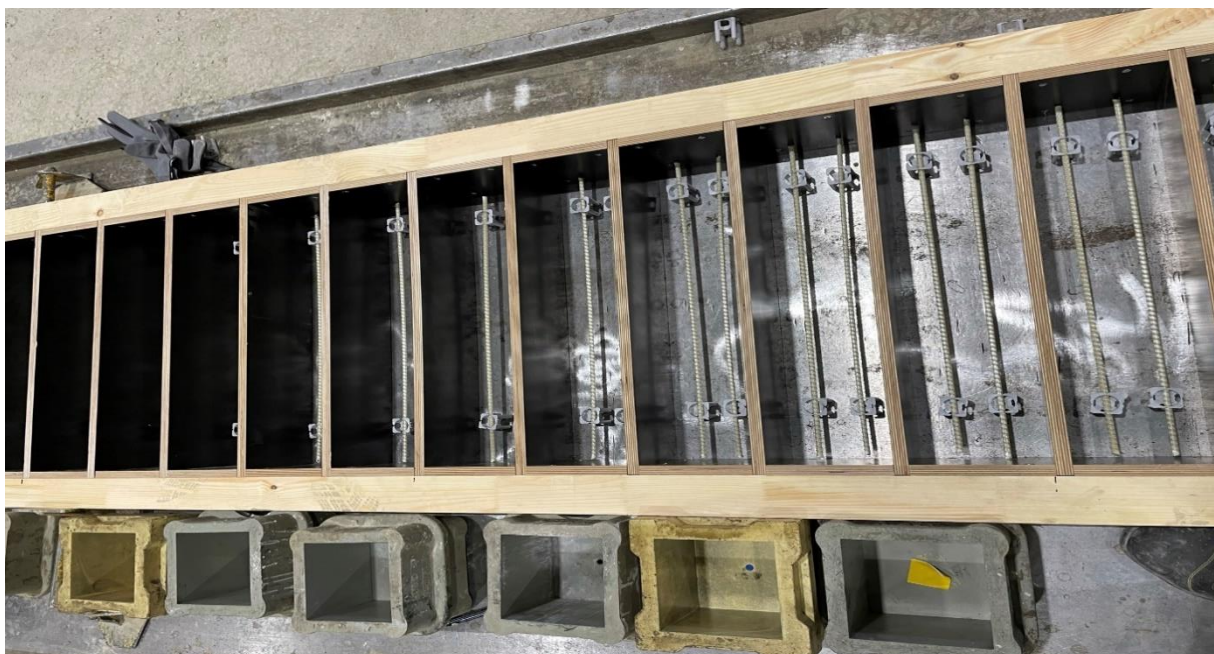
[29] EVS-EN 12390-3:2019. (2019). Kivistunud betooni katsetamine, Osa 3: Katsekehade survetugevus. Tallinn: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus.

[30] EVS-EN 12390-5:2019. (2019). Kivistunud betooni katsetamine, Osa 5: Katsekehade paindetõmbetugevus. Tallinn: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ

[31] EVS-EN 206:2014+A2:2021. (2021). Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus Tallinn: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus.

**LISAD**

## Lisa 1. Katsekehade valmistamine



a) Katsekehade jaoks valmistatud rakis.



b) Valatud katsekehad.

## Lisa 2. Katsekehade mõõtmistulemused

Katsekeha märgistus	Katsekeha mõõtmed mm		
	x-telg	y-telg	Pikkus, L
E1	150	150	605
E2	151	150	605
E3	150	149	605
E4	151	150	605
E5	151	149	605
T1	150	149	604
T2	153	148	603
T3	151	149	605
T4	151	150	605
T5	151	150	604
TJ1	150	149	605
TJ2	150	150	605
TJ3	151	151	603
TJ4	151	149	602
TJ5	151	149	602
PP1	151	150	605
PP2	151	149	603
PP3	151	151	601
PP4	150	150	605
PP5	151	149	605

**Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele  
kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö  
kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Raiko Rudissaar,

*(autori nimi)*

sünniaeg 08.08.1994,

annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Tekstiilijäätmete kasutamine betoonis,

*(lõputöö pealkiri)*

mille juhendaja on kaasprofessor Alexander Ryabchikov,

*(juhendaja(te) nimi)*

1.1.salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2.digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3.veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3.kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.



Lõputöö autor \_\_\_\_\_

*/allkirjastatud digitaalselt/*

Tartu, \_\_\_\_\_

*(kuupäev)*

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
*(juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)*

\_\_\_\_\_  
*/allkirjastatud digitaalselt/*